

Zbysław Dymaczewski, Joanna Jeż-Walkowiak, Michał Michałkiewicz, Marek M. Sozański

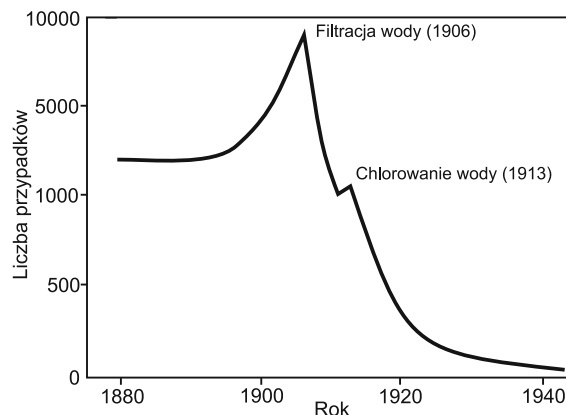
Znaczenie procesu dezynfekcji w zapewnieniu bezpieczeństwa mikrobiologicznego wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi

Dezynfekcja jest procesem, który zarówno tradycja, jak i współczesna nauka klasyfikują jako prekursora i promotora rozwoju technologii uzdatniania wody. Jest także pierwszym celem, który pośrednio określa, wymusza i ukierunkowuje większość pozostałych celów rozwoju technologii uzdatniania wody, dając tym samym podstawy bezpieczeństwa jakości wody do spożycia, rozumianego we współczesnych kategoriach określonych tradycją, praktyką oraz wymogami prawa [1,2]. Z genezą dezynfekcji wiążą się takie nazwiska, jak John Snow, Ludwik Pasteur i Robert Koch. John Snow w badaniach prowadzonych metodą dedukcji podczas epidemii cholery w Londynie (1854–1855) przedstawił wyjątkową – jak na ówczesne czasy – hipotezę przyczyn tej choroby, wskazując na niewidzialny żywy organizm przenoszony głównie przez wodę. Hipoteza ta okazała się zgodna z bakteryjną koncepcją chorób zakaźnych, podaną przez Ludwika Pasteura oraz została zweryfikowana przez Roberta Kocha, który około 30 lat później zidentyfikował w Indiach przecinkowce cholery (*Vibrio cholerae*). Ówczesny postęp w zakresie mikrobiologii i epidemiologii rozwiązał ostatecznie problem przyczyn tak zwanych epidemii wodnych – chorób zakaźnych przewodu pokarmowego przenoszonych drogą wodną, wskazując na dezynfekcję wody, jako skuteczną metodę zapobiegawczą. Doprowadziło to do zmiany stosowanych w miastach struktur gospodarki wodno-ściekowej, do których na stałe wprowadzono zakłady uzdatniania wody i oczyszczalnie ścieków. Współczesne systemy gospodarki wodno-ściekowej zostały z czasem uzupełnione także o odnowę wody, zwłaszcza w regionach o ograniczonych zasobach wodnych [3], co w połączeniu z czystą produkcją przyczynia się również do oszczędności finansowych w gospodarkach rozwijających się i rozwiniętych [4]. Nowym kierunkiem badań i działań legislacyjnych w zakresie odnowy wody jest pozyskanie wody zdanej do spożycia [5,6].

Chlorowanie – jeden ze standardowych procesów ówczesnych zakładów uzdatniania wody – okazało się bardzo skuteczną metodą dezynfekcji w eliminacji bakterii chorobotwórczych. Bakteriobójcza skuteczność tego procesu wynikała z poprawnie określonej dawki chloru, której wartość przekraczała zapotrzebowanie wody na chlor w stopniu gwarantującym obecność wolnego chloru w wodzie

w ilości $0,1 \div 0,3 \text{ mgCl}_2/\text{dm}^3$ po 30-minutowym czasie kontaktu. Zależność ta pozwoliła także na interpretację skutków dezynfekcji wody o niskiej jakości, która wymagała stosunkowo dużych dawek chloru, powodujących nieakceptowalny smak wody. Stąd też – co dziś jest oczywiste – proces dezynfekcji zaczęto prowadzić na końcu układu uzdatniania wody, a więc po stosowanych w tamtym czasie procesach sedymentacji i filtracji powolnej, z których szczególnie ten drugi wydatnie zmniejszał zapotrzebowanie wody na chlor. Szukając kompromisu pomiędzy skutecznością utleniania a minimalizacją zjawiska tworzenia produktów ubocznych, we współczesnych zakładach uzdatniania wody stosuje się technikę wielopunktowego dawkowania chemicznych utleniaczy w mniejszych dawkach [7] oraz poszukuje się technologii pozwalających skutecznie usuwać prekursora ubocznych produktów – zwłaszcza związki organiczne oraz bromki [8–13].

Do tradycyjnych osiągnięć uzdatniania wody – w tym dezynfekcji – i oczyszczania ścieków należy zaliczyć radykalną poprawę na przełomie XIX i XX wieku stanu sanitarnego i higieny miast oraz eliminację epidemii przenoszonych drogą wodną, a także podniesienie statystycznej długości życia o $12 \div 15$ lat. W tym też czasie pojawiło się pojęcie zdrowia publicznego, jako wyraz świadomości i odpowiedzialności społeczeństwa w zakresie zwalczania chorób, w szczególności zakaźnych. Efekty tych działań, na podstawie danych amerykańskich [14], zaprezentowano na rysunku 1, który przedstawia wyraźny spadek liczby zachorowań mieszkańców Filadelfii na dur brzuszny



Rys. 1. Wpływ filtracji i dezynfekcji wody na występowanie przypadków dury brzusznej w Filadelfii [14]

Fig. 1. Effect of filtration and water disinfection on typhoid fever occurrence in Philadelphia [14]

w wyniku wprowadzenia na początku XX wieku procesów uzdatniania wody, początkowo filtracji (1906), a następnie dezynfekcji chlorem (1913). Także przy obecnym stanie zanieczyszczenia środowiska i niewystarczających zasobach słodkiej wody zdrowie publiczne jest priorytetem zarówno państw o rozwiniętej gospodarce [15–17], jak i o niskiej świadomości sanitarnej i niedoborach wody [3, 18, 19].

Proces dezynfekcji a bezpieczeństwo wody

Metody dezynfekcji leżą również w obszarze obecnych działań z zakresu bezpieczeństwa jakości wody do spożycia, które są ukierunkowane na:

- cele i priorytety ochrony zdrowia publicznego [2],
- poznanie i eliminację trudności metodycznych procesu dezynfekcji,
- zadania dezynfekcji w całym systemie zaopatrzenia w wodę, łącznie z poprzedzającym ją układem technologicznym uzdatniania wody oraz siecią wodociągową.

Podstawowe cele i priorytety w zakresie ochrony zdrowia publicznego nie uległy zmianie. Największe ryzyko związane jest z zakażeniem mikrobiologicznym, jakie niesie ze sobą spożycie wody zawierającej drobnoustroje chorobotwórcze. Mimo ochrony źródeł wody mogą wystąpić trudne do przewidzenia skażenia mikrobiologiczne ujmowanej wody, prowadzące do tragicznych konsekwencji [20–22]. Stąd też właściwa jakość biologiczna wody, w tym wirusologiczna, bakteriologiczna i parazytologiczna, jest pierwszym i podstawowym kryterium jej przydatności do spożycia. Ryzyko zdrowotne spowodowane toksycznymi mikrozanieczyszczeniami sytuuje się niżej w stosunku do zanieczyszczeń mikrobiologicznych, ponieważ wynika ono z długotrwałej ekspozycji i nie powoduje tak ostrych, nagłych i rozległych skutków, jakim jest jednocześnie wystąpienie infekcji u znacznej liczby ludzi. Procedura szacowania ryzyka zdrowotnego w warunkach narażenia na substancje chemiczne wyjaśnia pojęcie tak zwanego akceptowalnego poziomu ryzyka, definiowanego (najczęściej) prawdopodobieństwem 10^{-5} , czyli wystąpienia jednego dodatkowego przypadku śmiertelnego w populacji 100 tys. osób w całym czasie życia człowieka, określonego na 70 lat. Należy podkreślić, że akceptowalne ryzyko nie jest synonimem bezpieczeństwa, lecz jest arbitralną decyzją podjętą przez przedstawicieli społeczeństwa, najczęściej w relacji do poziomu cywilizacyjnego, w tym głównie czynników zdrowotnych, społecznych i ekonomicznych tego społeczeństwa. Reguły zarządzania ryzykiem, stanowiące podstawę opracowanych zaleceń, rozporządzeń i dyrektyw, określają jakość wody do spożycia i mają decydujący wpływ na określenie zakresu i skuteczności uzdatniania wody, w tym jej dezynfekcji [23].

Większość trudności i problemów związanych z procesem dezynfekcji jest wynikiem:

- dużego zróżnicowania oporności na dezynfekcję poszczególnych grup patogenów (wirusy, bakterie, pierwotniaki), różnych postaci ich występowania (wegetatywna, przetrwalnikowa) oraz układów, jakie tworzą te patogeny (zawiesiny kłaczkowate, biofilm) [24–27],
- właściwości metod dezynfekcji, w tym opartych na procesach chemicznego utleniania, które w świetle kryteriów termodynamicznych nie są w stanie unieszkodliwić patogenów bez naruszenia stabilności i uaktywnienia domieszek chemicznych wody oraz tworzenia produktów ubocznych, w szczególności toksycznych [28, 29].

Chlor, który odegrał podstawową rolę w radykalnej poprawie zdrowia publicznego w czasie zwalczania epidemii wodnych zaczął być od 1974 r. zastępowany innymi środkami dezynfekcyjnymi z uwagi na jego wysoki potencjał tworzenia produktów ubocznych. Wykrycie trójhalemetanów w wodzie uzdatnionej w Stanach Zjednoczonych i Holandii [30, 31] zapoczątkowało w kolejnych dekadach badania nad produktami ubocznymi chlorowania i sposobami minimalizacji ich powstawania, przy czym prace nad metodami chemicznego utleniania, minimalizującymi powstawanie produktów ubocznych, są wciąż prowadzone [32, 33]. Opracowania przekrojowe wskazują na poprawę jakości wody z punktu widzenia produktów ubocznych dezynfekcji, jednak pod warunkiem stosowania przepisów i reguł wymuszających dobre praktyki technologiczne.

Do eksperymentalnych wskaźników podatności, z jaką substancje zawarte w wodzie wchodzi w reakcje z chlorem, zalicza się między innymi:

- zapotrzebowanie wody na chlor, określające ilość wolnego chloru zużytą we wszystkich reakcjach procesu chlorowania w określonym czasie,
- potencjał tworzenia trójhalemetanów, określający maksymalną ilość THM, jaka może powstać w wodzie podczas chlorowania.

Ilość powstających THM jest dobrze skorelowana z dawką chloru (Cl_2) [34], czasem trwania reakcji (t), pH wody, jej temperaturą (T) [35], zawartością bromków (Br^-) i ogólnego węgla organicznego (OWO), a także absorbancją w nadfiolecie przy długości fali 254 nm (UV) [36], co przykładowo obrazują zależności empiryczne zebrane w tabeli 1 [37]. Efektem badań nad produktami ubocznymi procesu chlorowania są zmiany w technologii wielu zakładów uzdatniania wody, obejmujące rezygnację z chlorowania – w szczególności wstępne – oraz zastosowanie ozonu lub dwutlenku chloru [38–40].

Dwutlenek chloru jest znacznie silniejszym utleniaczem niż chlor, przy tym nie tworzy on chlorowcopochodnych (w szczególności THM) oraz nie reaguje z azotem

Tabela 1. Zawartość ubocznych produktów chlorowania w funkcji wskaźników jakości wody [37]
Table 1. Concentration of chlorination process by-products as a function of water quality parameters [37]

Produkt uboczny, jednostka	Zależność funkcyjna
Suma trójhalemetanów (THM), $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$	$[\text{THM}] = 0,0309([\text{TOC}][\text{UV}])^{0,44}([\text{pH}] - 2,6)^{0,715}[\text{Cl}_2]^{0,409}([\text{Br}^-] + 1)^{0,036}t^{0,265}T^{1,06}$
Chloroform (CHCl_3), $\mu\text{g}/\text{dm}^3$	$[\text{CHCl}_3] = 0,278([\text{OWO}][\text{UV}])^{0,616}([\text{pH}] - 2,6)^{0,8}[\text{Cl}_2]^{0,391}([\text{Br}^-] + 1)^{-2,23}t^{0,265}T^{1,15}$
Bromodwuchlorometan (CHCl_2Br), $\mu\text{g}/\text{dm}^3$	$[\text{CHCl}_2\text{Br}] = 0,863([\text{OWO}][\text{UV}])^{0,177}([\text{pH}] - 2,6)^{0,925}[\text{Cl}_2]^{0,309}[\text{Br}^-]^{0,722}t^{0,271}T^{0,72}$
Dwubromochlorometan (CHClBr_2), $\mu\text{g}/\text{dm}^3$	$[\text{CHClBr}_2] = 2,57([\text{UV}][\text{OWO}])^{-0,184}([\text{pH}] - 2,6)^{1,35}[\text{Cl}_2]^{-0,0746}[\text{Br}^-]^{2,08}t^{0,252}T^{0,57}$
Kwas dwuchlorooctowy (DCAA), $\mu\text{g}/\text{dm}^3$	$[\text{DCAA}] = 0,605[\text{OWO}]^{0,291}[\text{UV}]^{0,726}[\text{Cl}_2]^{-0,480}([\text{Br}^-] + 0,01)^{-0,568}t^{0,239}T^{0,665}$
Kwas trójklorooctowy (TCAA), $\mu\text{g}/\text{dm}^3$	$[\text{TCAA}] = 87,182[\text{OWO}]^{0,355}[\text{UV}]^{0,901}[\text{pH}]^{-1,732}[\text{Cl}_2]^{0,881}([\text{Br}^-] + 0,01)^{-0,679}t^{0,239}$

Zakres stosowania równań: $[\text{OWO}] = 3,0 \div 13,8 \text{ mgC}/\text{dm}^3$, $[\text{UV}] = 0,063 \div 0,489$, $\text{pH} = 4,6 \div 9,8$, $T = 10 \div 30^\circ\text{C}$
 $[\text{Cl}_2] = 1,5 \div 69,0 \text{ mgCl}_2/\text{dm}^3$, $[\text{Br}^-] = 0,010 \div 1,245 \text{ mgBr}^-/\text{dm}^3$, $t = 0,10 \div 168 \text{ h}$

amonowym. Dwutlenek chloru jest równie skutecznym środkiem dezynfekcyjnym, działającym w szerszym zakresie wartości pH wody. Produktami ubocznymi ClO_2 są między innymi kwasy karboksylowe i aldehydy, a końcowymi – chloryny i chlorany. Jego praktyczne zastosowanie, jako końcowego środka dezynfekcyjnego, ogranicza się z tych względów do dawek nie większych niż $0,4 \text{ mgClO}_2/\text{dm}^3$. Dwutlenek chloru ma też największy potencjał zabezpieczenia jakości wody w sieci wodociągowej [41].

Promieniowanie nadfioletowe, jako najbardziej bezpieczny i wyjątkowo skuteczny środek dezynfekcyjny, wymaga bardzo dobrze uzdatnionej wody, w szczególności pozbawionej zawieszin, żelaza i manganu oraz bardzo niskiej mętności i intensywności barwy. Przy dobrze dobranych parametrach procesowych jest ono bardzo skuteczne w stosunku do oocyst *Cryptosporidium* [42, 43].

Ozon, jako najsilniejszy utleniacz chemiczny stosowany w praktyce wodociągowej, ma też największe potencjalne możliwości uzdatniania wody, tworząc stosunkowo najmniejszą ilość produktów toksycznych. Dotyczy to w szczególności wody nie zawierającej bromków, których obecność powoduje powstawanie toksycznych bromianów [11, 44, 45]. Współczesna praktyka zastosowania ozonu odchodzi od jednopunktowego wprowadzania do wody większej dawki ozonu, w kierunku stosowania mniejszych dawek wprowadzanych w kilku miejscach układu uzdatniania. Należy podkreślić, że ozon – jako stosunkowo najbezpieczniejszy chemiczny środek dezynfekcyjny – prowadzi do powstawania biodegradowalnych produktów, ułatwiających rozwój bakterii w sieci wodociągowej, stąd też nie jest on polecany do końcowej dezynfekcji wody [46, 47].

Zadania stawiane dezynfekcji, w odniesieniu do całego systemu zaopatrzenia w wodę, wskazują na jej wyjątkowo ważne miejsce w strukturze całego systemu, co wynika przede wszystkim z dążenia do osiągnięcia stabilności biologicznej wody w sieci wodociągowej poprzez zwiększanie skuteczności technologii uzdatniania wody. W tym zakresie zwraca się między innymi uwagę na:

– udział procesów poprzedzających dezynfekcję w usuwaniu patogenów (w tym form przetrwalnikowych) oraz konieczność ograniczenia mętności wody do wartości co najwyżej $0,1 \pm 0,3 \text{ NTU}$, jako warunku skuteczności dezynfekcji [48],

– rolę procesów (np. koagulacja z filtracją pospieszną, ozonowanie z filtracją biologiczną, nanofiltracja), które zmniejszają zawartość różnych form rozpuszczonych związków organicznych, w tym biodegradowalnych, takich jak rozpuszczony węgiel organiczny (RWO), przyswajalny węgiel organiczny (PWO) czy biodegradowalna frakcja rozpuszczonego węgla organicznego (BRWO), co w konsekwencji prowadzi do ograniczenia zawartości prekursorów produktów ubocznych, a także do zwiększenia skuteczności samej dezynfekcji oraz ochrony i zachowania wysokiej jakości wody w sieci wodociągowej [48, 49].

Dezynfekcja powinna zapewnić ochronę jakości i zachowanie mikrobiologicznej stabilności wody przez cały czas jej przebywania w sieci wodociągowej, co wymaga umiejętnego doboru rodzaju i dawki środka dezynfekcyjnego, dostosowanego do specyfiki systemu wodociągowego [50]. Narzędziem pomagającym w osiągnięciu biologicznej stabilności wody są programy informatyczne, umożliwiające modelowanie jakości wody w sieci wodociągowej. Dobrze skalibrowane programy umożliwiają określenie zasad i zakresu monitoringu, nawet przy zmiennych danych wejściowych (np. przy spadku lub wzroście populacji) [51–53].

Monitoring procesu dezynfekcji wody

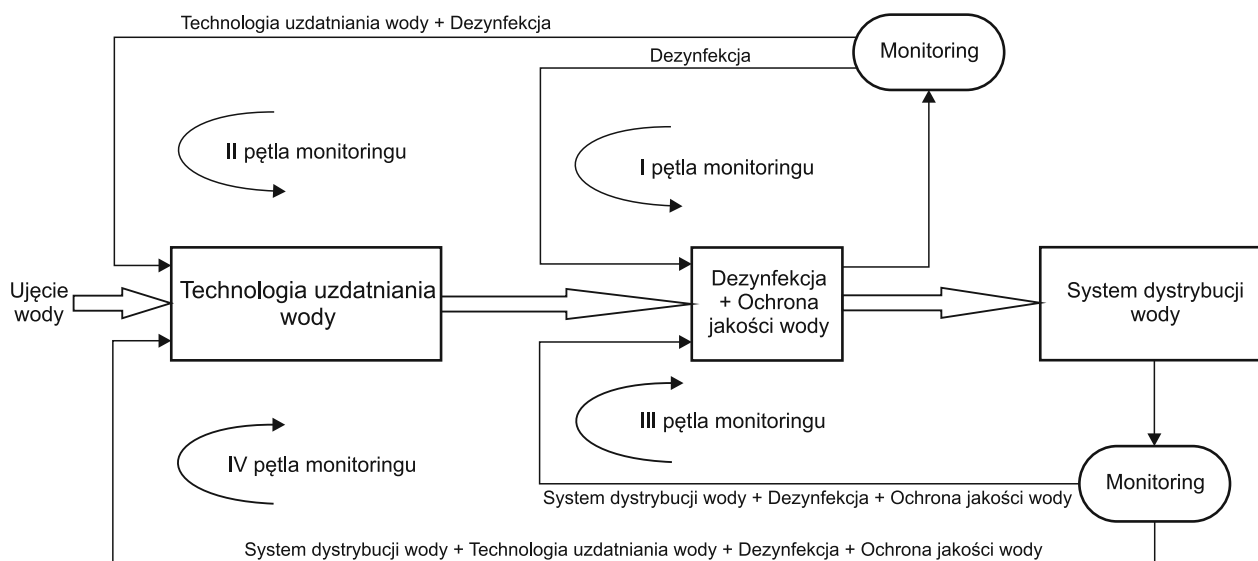
Rysunek 2 przedstawia koncepcję wielofunkcyjnego monitoringu procesu dezynfekcji w systemie zaopatrzenia w wodę, wraz z możliwościami jej oddziaływania na skuteczność technologii uzdatniania wody oraz na sieć wodociągową. Struktura monitoringu składa się z czterech zintegrowanych pętli monitoringu o różnym zasięgu i zakresie, umożliwiających uzyskanie różnych parametrów procesowych. Poszczególne pętle monitoringu obejmują:

I pętla:

– ocenę dezynfekcji (skuteczność mikrobiologiczna, produkty uboczne),
– korektę rodzaju i dawki środka dezynfekcyjnego.

II pętla:

– ocenę procesów uzdatniania wody (usuwanie zawieszin i patogenów, zmniejszenie mętności i intensywności barwy oraz zawartości ogólnego węgla organicznego, prekursorów i produktów ubocznych) oraz zapotrzebowania wody na środek dezynfekcyjny,



Rys. 2. Koncepcja wielofunkcyjnego monitoringu procesu dezynfekcji w systemie zaopatrzenia w wodę
Fig. 2. The concept of multifunctional monitoring of disinfection process in a water supply system

– korektę obejmującą intensyfikację efektów uzdatniania wody, szczególnie w zakresie powyższych wskaźników.

III pętla:

– ocenę sanitarną i fizyczno-chemiczną wody w sieci wodociągowej, w tym m.in. smak, zapach, tlen, bakterie heterotroficzne, zawartość pozostałego środka dezynfekcyjnego, produkty uboczne, formy związków węgla,

– korektę metody i parametrów dezynfekcji wody oraz ochrony jej jakości, a także sposobu czyszczenia sieci.

IV pętla:

– ocenę i porównanie jakości sanitarnej i fizyczno-chemicznej wody retencjonowanej w sieci wodociągowej i wody wprowadzanej do tej sieci po uzdatnianiu i dezynfekcji, w tym także biodegradowalnych związków organicznych i fosforu dostępnego dla mikroorganizmów, bakterii heterotroficznych, zapotrzebowania wody zawartej w przewodach wodociągowych na środek dezynfekcyjny zależnie od czasu jej retencji,

– korektę intensyfikacji biologicznych metod oczyszczania wody w celu zwiększenia biologicznej stabilności wody oraz ochrony jej jakości w sieci wodociągowej, a także czyszczenie sieci (jak w III pętli monitoringu).

Kompleksowy monitoring systemu zaopatrzenia w wodę oparty na koncepcji czterech zintegrowanych pętli monitoringu pozwala metodą kolejnych kroków, poprzez oddziaływanie na technologię uzdatniania wody i sieć wodociągową, dochodzić do stanu biologicznej stabilności wody w sieci. Punktem wyjścia jest dobrze rozwiązany proces dezynfekcji, oparty na kompleksowym działaniu co najmniej dwóch rodzajów chemicznych środków dezynfekcyjnych lub promieni nadfioletowych wraz z chemicznym środkiem dezynfekcyjnym. Dobrze rozwiązany proces dezynfekcji jest na ogół wynikiem badań pilotowych, prac przedprojektowych prowadzonych z uwzględnieniem układu uzdatniania wody oraz charakterystyki sieci wodociągowej, ze szczególnym uwzględnieniem procesu chemicznego utleniania i stosowanych utleniaczy. Najważniejsze zagadnienia warunkujące prawidłowe rozwiązanie procesu dezynfekcji, które powinny być podstawą analiz w fazie planowania i interpretacji wyników eksperymentów doświadczalnych, obejmują określenie:

– skuteczności procesu dezynfekcji (w skali logarytmicznej), w tym udziału procesów poprzedzających dezynfekcję w eliminacji patogenów [22],

– organizmu wskaźnikowego odpowiadającego złożonej metodzie dezynfekcji, na podstawie rankingu oporności mikroorganizmów z uwzględnieniem właściwości i składu wody [25, 54],

– skuteczności badanych metod dezynfekcji w funkcji iloczynu ilości środka dezynfekcyjnego i czasu kontaktu w komorze kontaktowej, wyznaczonego metodą znacznikową w skali pilotowej ($C \cdot t$) [55, 56],

– wpływu wartości wskaźników fizyczno-chemicznych i mikrobiologicznych wody (w szczególności takich, jak temperatura, mętność, rozpuszczony węgiel organiczny) na skuteczność dezynfekcji.

Wymagany procentowy poziom usuwania patogenów w celu zapewnienia bezpieczeństwa wody jest bardzo wysoki i jest zwykle określany w skali logarytmicznej (np. usunięcie mikroorganizmów w 99,99% określa się w tej skali jako 4log). Wymagany całkowity poziom dezynfekcji winien być określany na podstawie wieloletnich badań jakości ujmowanej wody. Aby określić wymagany poziom usuwania patogenów w procesie dezynfekcji należy od całkowitego wymaganego poziomu podanego w skali

logarytmicznej odjąć logarytmicznie wyrażony stopień usuwania mikroorganizmów uzyskany w procesach poprzedzających dezynfekcję. Poprawnie działające procesy usuwające cząstki stałe usuwają również mikroorganizmy na poziomie kilku stopni w skali logarytmicznej. Uregulowania obowiązujące w Stanach Zjednoczonych określają, że na przykład dobrze działające filtry pospieszne powinny usuwać cysty *Giardia* ze skutecznością na poziomie 2log [53, 57]. Jednak w niekorzystnych warunkach skuteczność usuwania patogenów w procesie filtracji może być znacznie mniejsza. Wartości określone w tych przepisach są w praktyce osiąmane pod warunkiem, że zachowana jest wysoka sprawność procesu filtracji (mętność $\leq 0,1$ NTU).

Mikroorganizmy charakteryzuje różna oporność na działanie środków dezynfekcyjnych, dlatego ważne jest, aby w przyjętej metodzie dezynfekcji ustalić odpowiedni organizm wskaźnikowy – tzn. organizm określający warunki prowadzenia dezynfekcji [25]. Na przykład, trudniej jest unieszkodliwiać chemicznie pierwotniaki z rodzaju *Cryptosporidium* niż wirusy i bakterie, co oznacza, że mogą one być organizmem wskaźnikowym, natomiast przy zastosowaniu promieniowania nadfioletowego, skutecznie unieszkodliwiającego oocysty *Cryptosporidium*, organizm ten nie powinien pełnić tej funkcji. Mechanizm działania promieni UV polega na wywołaniu zmian w strukturze DNA, a efekt biobójczy wynika głównie z dimeryzacji pirymidyn, co uniemożliwia replikację DNA i jego transkrypcję na RNA. Badania wykazały, że zastosowanie dawki promieniowania UV mniejszej niż śmiertelna może prowadzić do uruchomienia po naświetleniu mechanizmów naprawiających uszkodzone DNA [58, 59], dlatego też w każdym przypadku konieczne jest ustalenie odpowiedniej dawki promieniowania. Z danych doświadczalnych wynika, że stosowanie w procesie dezynfekcji dawki promieniowania nadfioletowego w zakresie $20\text{--}40 \text{ mJ/cm}^2$ zapewnia praktycznie całkowitą dezaktywację pierwotniaków z rodzajów *Cryptosporidium* i *Giardia* (na poziomie 4log) [60, 61].

Współczesna metoda projektowania procesu dezynfekcji opiera się na koncepcji iloczynu $C \cdot t$ oraz określeniu w badaniach pilotowych wpływu na wartości tych parametrów takich wskaźników jakości wody, jak pH i temperatura. Elementem tej metody jest między innymi doświadczalne określenie parametrów hydraulicznych przepływu wody w komorach reakcji, szczególnie w reaktorze do dezynfekcji wody promieniami nadfioletowymi. Wynikiem doświadczeń pilotowych powinno być ustalenie skuteczności dezynfekcji wody, w odniesieniu do określonych patogenów, wyrażonej w skali logarytmicznej w funkcji wartości iloczynu $C \cdot t$, a także określenie warunków wpływających na powstawanie produktów ubocznych dezynfekcji. Do podstawowych wskaźników jakości wody mających istotny wpływ na przebieg i skuteczność procesu dezynfekcji należą pH, mętność i OWO. Wartość pH wody wpływa na skuteczność dezynfekcji wody chlorem ze względu na powstawanie jonu podchlorynowego, a także wpływa na czas połowicznego rozpadu ozonu. W pracy [62] wykazano znaczny wzrost skuteczności dezynfekcji wody ozonem po procesie koagulacji przy niskim pH, co wynikało ze zmniejszenia ilości OWO w wodzie oraz przedłużenia czasu połowicznego rozpadu ozonu przy jej niższym pH. Znany jest również wpływ mętności wody na skuteczność wszystkich stosowanych metod dezynfekcji, jednak problematyka ta wymaga dalszych badań. Nowe osiągnięcia w zakresie pomiarów liczby cząstek i określenia ich charakterystyki na podstawie właściwości optycznych [63] mogą okazać się

bardzo pomocne w badaniach wpływu mętności na interpretację wyników procesu dezynfekcji wody. Jednym z hipotetycznych przykładów zastosowania tej metody, jako alternatywy klasycznego pomiaru mętności, może być jej przydatność do odróżnienia mętności wody powierzchniowej dobrej jakości spowodowanej na przykład cząstkami pochodzenia naturalnego (gliny, ropy) a mętnością wody powierzchniowej skażonej biologicznie. W obu przypadkach pomiar mętności metodą klasyczną wykaże jedynie wzrost wartości tego wskaźnika, bez określenia prawdopodobnej przyczyny. Nowa metoda, dzięki możliwościom optycznym, wykaże z dużym prawdopodobieństwem obecność mikroorganizmów na cząstkach powodujących mętność wody w drugim przypadku oraz ich brak w pierwszym.

Dezynfekcja wody, zapewniająca jej pełne bezpieczeństwo, nie jest możliwa bez skutecznej i stabilnej technologii uzdatniania, podobnie jak dążenie do osiągnięcia stabilności biologicznej wody w sieci wodociągowej nie jest możliwe bez zintegrowanego i kompleksowego monitoringu obejmującego cały system uzdatniania i dystrybucji wody (rys. 2). Utrzymywanie wymaganej jakości wody w sieci przez obecność w niej tak zwanej pozostałej ilości środka dezynfekcyjnego powinno być traktowane jedynie jako etap przejściowy w dochodzeniu do stanu naturalnej biologicznej stabilności wody w całym systemie dystrybucji. Złożoność problematyki dochodzenia do tego stanu wynika z następujących faktów:

- sieć wodociągowa stanowi duży i specyficzny reaktor hydrauliczny, chemiczny i biologiczny o długim czasie przetrzymania, w którym na przemian mogą występować strefy przepływu i stagnacji oraz natleniania i deficytu tlenu,

- woda w procesie uzdatniania jest doprowadzana do stanu równowagi chemicznej i biologicznej, jednak ten stan najczęściej nie zostaje utrzymany w warunkach wielogodzinnych, a nawet wielodobowych przebywania wody w sieci; ponadto pokryte biofilmem i osadem ścianki przewodów wodociągowych stwarzają korzystne warunki do wielu reakcji chemicznych, a nadmiar związków organicznych oraz związków azotu i fosforu stwarza korzystne warunki do rozwoju drobnoustrojów [29].

Dawka chemicznego środka dezynfekcyjnego, mająca na celu utrzymanie wymaganej jakości wody w sieci wodociągowej, jest sumą zapotrzebowania wody na ten środek (wynikającego z czasu jej retencji w sieci) oraz jego niewielkiego resztkowego nadmiaru pozostającego w retencjonowanej wodzie. Wartość tej dawki nie może być określona w laboratorium, ponieważ dotyczy ona wody będącej w dynamicznej równowadze ze ściankami przewodów sieci wodociągowej, w tym z błoną biologiczną. Niezbędne jest zatem doświadczalne określenie tego zapotrzebowania w badaniach eksploatacyjnych w skali technicznej, a więc prowadzonych w danej sieci wodociągowej na podstawie zmian zawartości środka dezynfekcyjnego w czasie. Zmniejszenie dawki środka dezynfekcyjnego można osiągnąć głównie przez:

- intensyfikację technologii uzdatniania wody, głównie w zakresie usuwania z niej rozpuszczonych związków organicznych,

- częste czyszczenie sieci wodociągowej według dobrze opracowanego harmonogramu, w celu usuwania błony biologicznej i ograniczenia jej aktywności metabolicznej,

- zmiany metody dezynfekcji wody z jednopunktowej (na wlocie do sieci) do wielopunktowej prowadzonej w różnych strefach sieci wodociągowej wyznaczonych na podstawie modelu matematycznego sieci,

- zmniejszenie czasu retencji wody w sieci (tak zwanego wieku wody) przez upraszczanie jej struktury oraz sukcesywne zmniejszanie średnic przewodów w wyniku prowadzenia odpowiednich inwestycji.

Podsumowanie

Dezynfekcja jest podstawowym procesem stosowanym w technologii uzdatniania wody, którego zadaniem jest zapewnienie jej bezpieczeństwa mikrobiologicznego. Dawka chemicznego środka dezynfekcyjnego, mająca na celu stałe utrzymywanie wymaganej jakości wody w sieci wodociągowej, powinna być wskaźnikiem monitorującym proces dochodzenia do naturalnej biologicznej stabilności wody w całym systemie dystrybucji, przy czym możliwość zmniejszenia jej wartości w wyniku działań modernizacyjnych oznacza wzrost stabilności biologicznej wody. Proces dezynfekcji jest elementem integrującym cały system zaopatrzenia w wodę, obejmujący zarówno technologię uzdatniania wody, jak i układ jej dystrybucji. Takie podejście wynika z miejsca i roli dezynfekcji w systemie, jako bardzo ważnego ogniwa między układem technologicznym uzdatniania wody a siecią wodociągową. Koncepcja ta zakłada wykorzystanie dezynfekcji również jako procesu monitorującego i diagnozującego skuteczność i bezpieczeństwo całego systemu zaopatrzenia w wodę.

LITERATURA

1. S. DEEM, N. FEAGIN: Disinfection data integrity in Washington State. *Journal – American Water Works Association* 2016, Vol. 108, No. 10, pp. 24–30.
2. Guidelines for Drinking-water Quality, fourth edition. WHO, Geneva 2011.
3. A.A. RINCÓN: Public-private partnerships used to manage water in Mexico: Puebla, a case study. *Journal – American Water Works Association* 2016, Vol. 108, No. 5, pp. 40–45.
4. T.H.Y. KIM, C. PARK, S. KIM: Water recycling from desalination and purification process of reactive dye manufacturing industry by combined membrane filtration. *Journal of Cleaner Production* 2005, Vol. 13, pp. 779–786.
5. B. EIDSON: Testing potable reuse messages with a utility-university partnership. *Journal – American Water Works Association* 2015, Vol. 107, No. 11, pp. 54–57.
6. Z.Y. MOVAHED, B.B. MOVAHED: The need for water reuse guidelines for designing and operating membrane facilities. *Journal – American Water Works Association* 2015, Vol. 107, No. 11, pp. 63–69.
7. U. OLSIŃSKA: Charakterystyka metod zapobiegania powstawaniu bromianów(V) w wodzie przeznaczonej do spożycia (Characteristics of bromate formation prevention methods in water intended for human consumption). *Ochrona Środowiska* 2017, vol. 39, nr 2, ss. 17–26.
8. Y. HUANG, H. ZHANG, A. ZAMYADI, S. ANDREWS, R. HOFMANN: Predicted impact of aeration on toxicity from trihalomethanes and other disinfection byproducts. *Journal – American Water Works Association* 2017, Vol. 109, No. 10, pp. 13–21.
9. J.M. LAINÉ, J.G. IJACANGELO, E.W. CUMMINGS, K.E. CARNS, J. MALLEVIALLE: Influence of bromide on low pressure membrane filtration for controlling DBPs in surface waters. *Journal – American Water Works Association* 1993, Vol. 85, No. 6, pp. 87–99.
10. M. SELBES, J. BROWN, C. LAUDERDALE, T. KARANFIL: Removal of selected C- and N-DBP precursors in biologically active filters. *Journal – American Water Works Association* 2017, Vol. 109, No. 3, pp. E73–E84.

11. Z. LIU, Y. CUI, J. CHEN, Z. YAN: The control of bromate formation in ozonation of bromide-containing water. *Desalination and Water Treatment* 2014, Vol. 52, No. 25–27, pp. 4942–4946.
12. Q. WANG, Z. YANG, J. MA, J. WANG, L. WANG, M. GUO: Study on the mechanism of cerium oxide catalytic ozonation for controlling the formation of bromate in drinking water. *Desalination and Water Treatment* 2016, Vol. 57, No. 33, pp. 15533–15546.
13. Bromine as a Drinking-water Disinfectant. WHO, Geneva 2018.
14. E. D. KILBOURNE, W. G. SMILLIE [Eds.]: Human Ecology and Public Health. 4th Edition. Macmillan, New York 1969.
15. Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual. United States Environmental Protection Agency, 815-R-99-014, 1999.
16. Toxicological Review of Bromate. United States Environmental Protection Agency, EPA/635/R-01/002, Washington DC 2001.
17. 2012 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. United States Environmental Protection Agency, EPA/822-5-12-001, Washington DC 2012.
18. L. GEIGER: The value of water in Mali. *Journal – American Water Works Association* 2015, Vol. 107, No. 10, pp. 46–52.
19. M. JAKARIYA, A.M. FARID: Challenges to improve water and sanitation facilities in Bangladesh. *Journal – American Water Works Association* 2016, Vol. 108, No. 5, pp. 53–62.
20. M.M. SOZAŃSKI, P.M. HUCK: Badania doświadczalne w rozwoju technologii uzdatniania wody. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2007, nr 42.
21. L. D. BOURDON, J. LIGGETT, F. P. SIDARI III, S. TRIANTAFYLIDOU: Preventing disease from *Legionella* is a shared responsibility. *AWWA Opflow* 2019, Vol. 45, No. 2, pp. 10–13.
22. L. C. VERMEULEN, M. van HENGEL, C. KROEZE, G. MEDEMA, J. E. SPANIER, M. T. H. van VLIET, N. HOFSTRA: *Cryptosporidium* concentrations in rivers worldwide. *Water Research* 2019, Vol. 149, pp. 202–214.
23. R. TFAILY, I. PAPINEAU, R. C. ANDREWS, B. BARBEAU: Application of quantitative microbial risk assessment at 17 Canadian water treatment facilities. *Journal – American Water Works Association* 2015, Vol. 107, No. 10, pp. E497–E508.
24. P. S. STEWERT, J. W. COSTERTON: Antibiotic resistance of bacteria in biofilms. *Lancet* 2001, Vol. 358, pp. 135–138.
25. V. J. HARWOOD, A. D. LEVINE, T. M. SCOTT, V. CHIVUKULA, J. LUKASIK, S. R. FARRAH, J. B. ROSE: Validity of the indicator organism paradigm for pathogen reduction in reclaimed water and public health protection. *Applied and Environmental Microbiology* 2005, Vol. 71, No. 6, pp. 3163–3170.
26. M. J. ADELMAN, M. PHELPS, R. T. HADACEK, O. R. SLOSSER, S. CALVET, J. OPPENHEIMER, J. H. BORCHARDT: Required $C \times T$ value for 5-log virus inactivation at full scale. *Journal – American Water Works Association* 2016, Vol. 108, No. 1, pp. E18–E26.
27. B. KOŁWZAN: Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowania (Analysis of biofilms – their formation and functioning). *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 3–14.
28. M. M. BENJAMIN: Water Chemistry. 2nd Edition. Waveland Press, Inc., Long Grove (USA) 2015.
29. A. OLEJNIK, J. NAWROCKI: Czy woda wodociągowa musi być dezynfekowana chemicznie? (Does drinking water have to be chemically disinfected?). *Ochrona Środowiska* 2013, vol. 35, nr 4, ss. 3–8.
30. J. J. ROOK: Formation of haloforms during chlorination of natural waters. *Water Treatment and Examination* 1974, Vol. 23, pp. 234–243.
31. T. A. BELLAR, J. J. LICHTENBERG, R. C. KRONER: The occurrence of organohalides in chlorinated drinking water. *Journal – American Water Works Association* 1974, Vol. 66, pp. 703–706.
32. T. F. CLARK: DBP Control in an expanding regional water supply system. *Journal – American Water Works Association* 2016, Vol. 108, No. 7, pp. 43–47.
33. C. C. SAMSON, C. J. SEIDEL, R. S. SUMMERS, T. BARTRAND: Assessment of HAA9 occurrence and THM, HAA speciation in the United States. *Journal – American Water Works Association* 2017, Vol. 109, No. 7, pp. E288–E301.
34. J. XU, C. HUANG, X. SHI, S. DONG, B. YUAN, T. H. NGUYEN: Role of drinking water biofilms on residual chlorine decay and trihalomethane formation: An experimental and modeling study. *Science of The Total Environment* 2018, Vol. 642, pp. 516–525.
35. O. N. OZDEMIR, T. BUYRUK: Effect of travel time and temperature on chlorine bulk decay in water supply pipes. *Journal of Environmental Engineering* 2018, Vol. 144, No. 3.
36. W. SUNG, B. REILLEY-MATTHEWS, D. K. O'DAY, K. HERRIGAN: Modeling DBP formation. *Journal – American Water Works Association* 2000, Vol. 92, No. 5, pp. 53–63.
37. A. D. GREINER, A. OBOLENSKY, P. C. SINGER: Technical note: Comparing predicted and observed concentrations of DBPs. *Journal – American Water Works Association* 1992, Vol. 84, pp. 99–102.
38. T. CHAIKET, P. C. SINGER, A. MILES, M. MORAN, C. PALLOTTA: Effectiveness of coagulation, ozonation, and biofiltration in controlling DBPs. *Journal – American Water Works Association* 2002, Vol. 94, No. 12, pp. 81–95.
39. G. W. HOLDEN: Chlorine dioxide preoxidation for DBP reduction. *Journal – American Water Works Association* 2017, Vol. 109, No. 7, pp. 36–43.
40. R. ZHAO, D. A. RECKHOW, W. C. BECKER, S. SCHINDLER: Seasonal variation of disinfection byproduct precursors in a large water supply. *Journal – American Water Works Association* 2018, Vol. 110, No. 11.
41. E. VESCHETTI, B. CITTADINI, D. MARESCA, G. CITTI, M. OTTAVIANI: Inorganic by-products in waters disinfected with chlorine dioxide. *Microchemical Journal* 2005, Vol. 79, pp. 165–170.
42. W. HIJNEN, E. BEERENDONK, G. MEDEMA: Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. *Water Research* 2006, Vol. 40, pp. 3–22.
43. J. P. MALLEY Jr.: Where we're headed 20 years after UV technology stunned the drinking water industry. *Journal – American Water Works Association* 2018, Vol. 110, No. 12, pp. 58–60.
44. U. von GUNTEN: Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. *Water Research* 2003, Vol. 37, pp. 1469–1487.
45. M. B. HEEB, J. CRIQUET, S. G. ZIMMERMANN-STEFFENS, U. von GUNTEN: Oxidative treatment of bromide-containing waters: Formation of bromine and its reactions with inorganic and organic compounds – a critical review. *Water Research* 2014, Vol. 48, pp. 15–42.
46. J. SOHN, G. AMY, Y. YOON: Process-train profiles of NOM through a drinking water treatment plant. *Journal – American Water Works Association* 2007, Vol. 99, No. 6, pp. 145–153.
47. I. FISHER, G. KASTL, F. SHANG, A. SATHASIVAN: Framework for optimizing chlorine and byproduct concentrations in drinking water distribution systems. *Journal – American Water Works Association* 2018, Vol. 110, No. 11, pp. 38–49.
48. P. M. HUCK, B. M. COFFEY, M. B. EMELKO, D. D. MAURIZIO, R. M. SLAWSON, W. B. ANDERSON, J. van der OEVER, A. P. DOUGLAS, C. R. O'MELIA: Effects of filter operation on *Cryptosporidium* removal microbial pathogens. *Journal – American Water Works Association* 2002, Vol. 94, No. 6, pp. 97–111.
49. B. SIEMBIDA-LÖSCH, W. B. ANDERSON, J. BONSTEEL, P. M. HUCK: Pretreatment impacts on biopolymers in adjacent ultrafiltration plants. *Journal – American Water Works Association* 2014, Vol. 106, No. 9, pp. E372–E382.

50. D. VACS RENWICK, A. HEINRICH, R. WEISMAN, H. ARVANAGHI, K. ROTERT: Potential public health impacts of deteriorating distribution system infrastructure. *Journal – American Water Works Association* 2019, Vol. 111, No. 2, pp. 42–53.
51. T. WALSKI: Procedure for hydraulic model calibration. *Journal – American Water Works Association* 2017, Vol. 109, No. 6, pp. 55–61.
52. I. FISHER, G. KASTL, A. SATHASIVAN: New model of chlorine-wall reaction for simulating chlorine concentration in drinking water distribution systems. *Water Research* 2017, Vol. 125, 2017, pp. 427–437.
53. A. S. GORZALSKI, G. W. HARRINGTON, O. CORONELL: Modeling water treatment reactor hydraulics using reactor networks. *Journal – American Water Works Association* 2018, Vol. 110, No. 8, pp. 13–29.
54. P. PAYMENT, E. FRANCO: Clostridium perfringens and somatic coliphages as indicators of the efficiency of drinking water treatment for viruses and protozoan cysts. *Applied and Environmental Microbiology* 1993, Vol. 59, No. 8, pp. 2418–2424.
55. I. FISHER, G. KASTL, A. SATHASIVAN: A comprehensive bulk chlorine decay model for simulating residuals in water distribution systems. *Urban Water Journal* 2016, Vol. 14, No. 4, pp. 361–368.
56. E. C. WERT, J. LEW, K. L. RAKNESS: Effect of ozone dissolution systems on ozone exposure and bromate formation. *Journal – American Water Works Association* 2017, Vol. 109, No. 7, pp. E302–E312.
57. Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water System Using Surface Water Sources. United States Environmental Protection Agency, Washington DC 1991.
58. L. J. ZIMMER, R. M. SLAWSON: Potential repair of *Escherichia coli* DNA following exposure to UV radiation from both medium- and low-pressure UV sources used in drinking water treatment. *Applied Environmental Microbiology* 2002, Vol. 68, No. 7, pp. 3293–3299.
59. L. J. ZIMMER, R. M. SLAWSON, P. M. HUCK: Inactivation and potential repair of *Cryptosporidium parvum* following low- and medium-pressure ultraviolet irradiation. *Water Research* 2003, Vol. 37, No. 14, pp. 3517–3523.
60. L. J. ZIMMER: Inactivation and potential repair of selected waterborne pathogens exposed to ultraviolet radiation. Master's Thesis, University of Waterloo, Waterloo (Canada) 2002.
61. O. HOYER: Testing and monitoring the efficacy of UV-disinfection systems – the German DVGW approach. Proceedings of 1st IUVA World Congress, Washington DC 2001.
62. D. URFER, P. M. HUCK, G. A. GAGNON, D. MUTTI, F. SMITH: Modeling enhanced coagulation to improve ozone disinfection. *Journal – American Water Works Association* 1999, Vol. 91, No. 3, pp. 59–73.
63. E. PHILLIPPI, G. W. HARRINGTON, B. LAU, D. THOMAS, S. RUSSELL: A closer look at filter effluent particles using image-based particle analysis. Proceedings of Membrane Technology Conference, American Water Works Association, Denver 2005.

Dymaczewski, Z., Jez-Walkowiak, J., Michalkiewicz, M., Sozanski, M.M. Role of Disinfection Process in Ensuring Microbiological Safety of Drinking Water. *Ochrona Srodowiska* 2019, Vol. 41, No. 1, pp. 3–9.

Abstract: The paper discusses the origins and tradition of disinfection process application in water treatment systems paying special attention to its complexity and methodological problems. Disinfection was presented as the main objective of water treatment technology that guarantees safe microbiological water quality. A new approach to the process of disinfection was proposed as a result of the expansion of its functions and objectives as a foundation for drinking water quality safety. It was demonstrated that disinfection should become an integral part of the whole water supply system, comprising both water treatment

technology and distribution system. Such an approach results from the position of disinfection process in the system, as an indirect link between the technological system and distribution network. The concept also assumes use of disinfection to monitor and diagnose safety of the water supply system as a whole. Attention was also paid to the research tasks accompanying design and operation of the disinfection process in combination with a reliable evaluation of biological water stability in water networks. The article presents the analysis of methodological criteria of the disinfection process affecting chemical oxidant and dose selection, contact time, dosing site location as well as by-product identification and reduction in their formation.

Keywords: Water treatment, disinfection, disinfection by-products, biological water stability, monitoring.