

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

## DEZYNFEKCJA ŚCIEKÓW

**Streszczenie.** W artykule poddano dyskusji konieczność stosowania dezynfekcji ścieków w aspekcie ochrony zdrowia publicznego i wymagań stawianych jakości ścieków oczyszczonych. Przedstawiono metody stosowane w dezynfekcji ścieków. Omówiono obowiązujące w Polsce i za granicą regulacje prawne i praktykę dotyczącą dezynfekcji ścieków.

**Słowa kluczowe:** Ścieki, dezynfekcja.

### WPROWADZENIE

Dezynfekcja, czyli odkażanie jest procesem niszczenia drobnoustrojów, w szczególności chorobotwórczych, metodami fizycznymi i chemicznymi.

Woda stanowi poważny czynnik w przenoszeniu chorób zakaźnych. Źródłem zakażeń przenoszonych tą drogą są najczęściej wydaliny ludzkie znajdujące się w ściekach bytowo-gospodarczych i szpitalnych, głównie z oddziałów zakaźnych, wydaliny zwierzęce w ściekach m.in. z ferm hodowlanych a także wody opadowe i roztopowe. Niebezpieczne patogenne wirusy, bakterie, protisty, grzyby i różne postacie inwazyjne robaków pasożytniczych występują w ściekach w ogromnych ilościach.

Zaniechanie dezynfekcji ścieków pochodzących np. ze szpitali chorób zakaźnych mogłoby spowodować niekontrolowane rozprzestrzenianie się groźnych chorób. Nie ustabilizowane biologicznie osady ściekowe nie nadają się do wykorzystania rolniczego. Skratki i piasek powstające podczas mechanicznego oczyszczania ścieków mogą stanowić poważne źródło chorobotwórczych mikroorganizmów. Są one najczęściej higienizowane za pomocą wapna chlorowanego. Proces ten jest jednak mało efektywny, gdyż nie niszczy on wszystkich pasożytów i bakterii chorobotwórczych. W ten sposób doprowadzają do skażenia składowisk i okolicznych terenów poprzez ich przenikanie do wód podziemnych i powierzchniowych, a także do atmosfery w postaci bioaerozoli [2].

Obecność mikroorganizmów patogennych w ściekach jest niebezpieczna gdyż stanowią one bezpośrednie zagrożenie epidemiologiczne oraz mogą wywoływać różne alergię, działać toksycznie lub immunotoksycznie na człowieka, zwierzęta i na otaczające środowisko.

---

Michał MICHAŁKIEWICZ, Joanna JEŻ-WALKOWIAK, Zbysław DYMACZEWSKI,  
Marek M. SOZAŃSKI – Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska

Liczne drobnoustroje występujące w ściekach zostały umieszczone na liście szkodliwych czynników biologicznych dla pracowników oczyszczalni ścieków, pracowników kanalizacji miejskiej oraz hydraulików i konserwatorów urządzeń wodno-kanalizacyjnych. W wykazie tym znajduje się kilkadziesiąt patogennych wirusów, bakterii, grzybów i pasożytów zaliczanych do różnych grup zagrożenia (skala 1-4 wg klasyfikacji Ministra Zdrowia [13], UE i Instytutu Medycyny Wsi [1]).

Bakterie wskaźnikowe spełniają zatem rolę ostrzegawczą przed zakażeniami, ponieważ występuje istotna zależność pomiędzy ich liczebnością w wodzie, a liczbą mikroorganizmów chorobotwórczych.

## EFEKTYWNOŚĆ PROCESÓW OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW W USUWANIU MIKROORGANIZMÓW

Klasyczne procesy oczyszczania ścieków zapewniają wysoki, bo sięgający do 99% stopień redukcji liczby bakterii. Pomimo tak wysokiej efektywności usuwania bakterii ze ścieków nadal zawierają one m.in. od  $10^4$  do  $10^6/100$  ml wskaźnikowych bakterii grupy coli.

Metcalf i Eddy [11] podają typowe efektywności usuwania bakterii ze ścieków w procesach ich oczyszczania. Wartości te zamieszczono w tabeli 1. Pierwsze cztery procesy są wykorzystane w oczyszczaniu mechanicznym. Ich efektywność w usuwaniu mikroorganizmów jest znacznie niższa od efektywności procesów chemicznych i biologicznych.

**Tabela 1.** Usuwanie lub unieszkodliwianie mikroorganizmów w procesach oczyszczania ścieków  
**Table 1.** Removal or neutralization of microorganisms in wastewater treatment processes

PROCES	EFEKTYWNOŚĆ USUWANIA MIKROORGANIZMÓW [%]
Kraty rzadkie	0 - 5
Kraty gęste	10 - 20
Piaskownik	10 - 25
Sedymentacja	25 - 75
Chemiczne strącanie	40 - 80
Złoża biologiczne	90 - 95
Osad czynny	90 - 98
Dezynfekcja chlorem oczyszczonych ścieków	98 - 99,999

Na podstawie danych literaturowych [2,11] można stwierdzić, że w procesach mechanicznego oczyszczania usuwa się ze ścieków około:

- 20% ogólnej liczby bakterii,
- 90% bakterii z rodzaju *Salmonella* i prątków gruźlicy.

a w procesach biologicznego oczyszczania ścieków przy użyciu osadu czynnego efektywności te wynoszą:

- 90÷98% obniżki ogólnej liczby bakterii,
- 55÷98% obniżki bakterii z rodzaju *Salmonella*,
- 45% obniżki prątków gruźlicy.

Mikroorganizmy usuwane ze ścieków nie są jednak unieszkodliwiane, tylko w postaci żywych komórek lub form inwazyjnych przedostają się do:

- skratek zatrzymywanych na kratkach,
- piasku oddzielanego ze ścieków w piaskownikach,
- osadów pochodzących z osadników wstępnych i wtórnych.

Częściowe unieszkodliwianie mikroorganizmów chorobotwórczych w osadach następuje podczas:

- stabilizacji beztlenowej (fermentacji metanowej),
- stabilizacji tlenowej,
- kompostowania.

W procesach tych unieszkodliwia się około 85÷98% ogólnej liczby mikroorganizmów chorobotwórczych, z wyjątkiem wirusów oraz jaj robaków pasożytniczych. To częściowe zabijanie mikroorganizmów chorobotwórczych, zachodzące podczas przeróbki i unieszkodliwiania osadów, posiada cechy naturalnej dezynfekcji. Proces ten, określany także jako stabilizacja osadów, ma również na celu usunięcie z osadów związków organicznych szybko biologicznie rozkładalnych, przyczyniających się do zagniwania osadów i w konsekwencji do wydzielanie gazów odorowych [2].

## **METODY DEZYNFEKCJI ŚCIEKÓW**

Liczne metody stosowane do zabijania mikroorganizmów w różny sposób działają na komórki wegetatywne i formy przetrwalnikowe. Inaczej na dany środek (metodę) reagują wirusy, inaczej bakterie i grzyby, a jeszcze w inny sposób pasożytnicze protisty (pierwotniaki) i robaki. Niezależnie jednak od stanowiska systematycznego danego organizmu, każdy z nich w swojej budowie wewnętrznej posiada białko oraz kwasy nukleinowe, które odpowiedzialne są za pełnienie funkcji życiowych. Podstawowe metody eliminacji mikroorganizmów polegają najczęściej na zniszczeniu lub uszkodzeniu tych struktur, doprowadzając m.in. do denaturacji lub koagulacji białek lub na zakłócaniu syntezy białek, replikacji kwasów nukleinowych i inhibicji licznych enzymów. Denaturacja, to zmiana struktury II-IV rzędowej biopolimerów przez zerwanie wiązań wodorowych i mostków disiarczkowych. Najczęściej dotyczy ona białek. Na skutek denaturacji następuje utrata właściwości biologicznych i nieodwracalna koagulacja (ściananie się białka), które doprowadzają do śmierci organi-

zmu. Spowodowana jest działaniem podwyższonej temperatury, kwasów, zasad, jonów metali ciężkich, niektórych rozpuszczalników organicznych, detergentów, promieni UV i wysokiego ciśnienia.

Oocysty wielu gatunków protistów (*Cryptosporidium*, *Giardia*, *Cyclospora* i *Microsporidium*) są odporne na większość środków dezynfekujących. Cysty *Giardia* są bardzo odporne na warunki środowiska, potrafią przetrwać w wilgotnej ziemi, w wodzie i ściekach przez kilka miesięcy. Nie zabija ich nawet klasyczne chlorowanie wody. Dwutlenek chloru oraz ozon są bardziej efektywne w zabijaniu *Cryptosporidium* niż inne środki dezynfekcyjne. UV natomiast jest efektywny w zabijaniu bakterii, a mniej skuteczny w stosunku do wirusów i pasożytów.

Klasyczna dezynfekcja ścieków i produktów ubocznych, które powstają podczas procesów oczyszczania, określana jest jako dezynfekcja właściwa. Może być ona przeprowadzana metodami fizycznymi i chemicznymi. Do podstawowych fizycznych metod dezynfekcji zaliczamy:

- pasteryzację
- promieniowanie UV
- filtrację membranową
- termiczne suszenie
- promieniowanie jonizujące (dezynfekcja radiacyjna)
- ultradźwięki.

Chemiczne metody dezynfekcji polegają na dawkowaniu związków utleniających, głównie:

- z grupy chlorowców (chlor, podchloryn sodowy, wapno chlorowane, podchloryn wapniowy, dwutlenek chloru, wodorotlenek wapnia, tlenek wapnia),
- ozonu,
- kwasu nadoctowego,
- zastosowaniu alternatywnych metod dezynfekcji (np. metoda PEROXONE).

## FIZYCZNE METODY DEZYNFEKCJI

### Pasteryzacja

Pasteryzacja, czyli proces termicznego odkażania osadu przefermentowanego, rzadziej surowego, polega na jego ogrzaniu do temperatury w granicach 65÷90 °C w czasie od 5 do 30 minut. Optymalna temperatura pasteryzacji to 65÷70 °C, co zapewnia wysoki stopień zabijania mikroorganizmów chorobotwórczych. Czynnikiem grzewczym jest najczęściej para wodna, czasem podgrzany osad lub gorąca woda. Podczas klasycznej pasteryzacji niszczy się formy wegetatywne drobnoustrojów, a formy zarodnikowe i przetrwalniki bakterii giną dopiero przy stosowaniu temperatur powyżej 100 °C. Na ogół stosuje się wtedy temperaturę 120 °C w czasie 15÷30 minut, w gorącej parze wodnej pod ciśnieniem około 2 atmosfer.

Całkowite wyjąłowanie osadów można uzyskać również w temperaturach  $65\div 70^{\circ}\text{C}$ , jak przy klasycznej pasteryzacji. Wymaga to jednak stosowania kilkukrotnej pasteryzacji (najczęściej trzykrotnej) z 24 godzinnymi przerwami, a sama metoda nosi nazwę pasteryzacji frakcjonowanej (tyndalizacja osadów).

Pasteryzacja może być realizowana w różnych miejscach procesu technologicznego: przed fermentacją, między I a II stopniem fermentacji metanowej, po fermentacji i po stabilizacji tlenowej. Specyficznym procesem dezynfekcji osadów jest metoda równoczesnej pasteryzacji i fermentacji. W metodzie tej osady podgrzewa się do temperatury  $70^{\circ}\text{C}$  i utrzymuje w komorze pasteryzacji przez około 12 minut, a następnie zdezynfekowane osady przepompowuje się do komory fermentacji mezofilnej, w której w czasie 14 dni utrzymywana jest temperatura  $36\div 45^{\circ}\text{C}$ . Tak przetworzony osad jest bardzo czysty pod kątem mikrobiologicznym i pewny pod względem higieniczno-sanitarnym [2,10].

### **Promieniowanie UV**

Mechanizm działania promieni UV nie jest do końca w pełni wyjaśniony. Promieniowanie UV powoduje błyskawiczną reakcję fotochemiczną w kwasie dezoksyrybonukleinowym (DNA) i rybonukleinowym (RNA), które decydują o życiu wszystkich mikroorganizmów. Dzięki tej reakcji mikroorganizmy albo zostają zabite, albo też tracą zdolność rozmnażania się. Najmniej odporne na działanie promieniowania UV są bakterie i wirusy, nieco bardziej drożdże, a najbardziej pleśnie. Formy przetrwalnikowe są bardziej odporne od form wegetatywnych. Największą skuteczność dezynfekcyjną w stosunku do mikroorganizmów wykazuje promieniowanie UV-C o długości fali ok. 254 nm.

Promieniowanie ultrafioletowe wykazuje właściwości bakteriobójcze przy zastosowaniu odpowiednio długiego czasu działania i jego natężenia. Przy niskich dawkach i krótkich czasach kontaktu z promieniami UV procent bakterii ulegających zabiciu wyraźnie maleje. Niskie dawki mogą jednocześnie powodować mutacje. Najsilniejsze działanie bakteriobójcze wykazują fale o długości 230-275 nm, a więc fale absorbowane przez kwasy nukleinowe i białka [8].

Podstawowy mechanizm bakteriobójczego działania promieni UV związany jest głównie ze zmianami wywołanymi w kwasach nukleinowych, głównie w nukleotydach DNA. Stwierdzono, że w bakteriach naświetlanych promieniami UV powstają dimery tyminy, cytozyny i mieszane dimery cytozynowo-tyminowe, a także hydratacji ulega cytozyna. Powstający w łańcuchu nukleinowym dimer tyminy uniemożliwia normalny przebieg replikacji DNA, a w konsekwencji prowadzi do zmiany jego struktury w danym odcinku i do mutacji lub śmierci komórki. Promieniowanie UV działa także pośrednio na bakterie przez wytwarzanie w podłożu i w komórkach różnego rodzaju nadtlenków, które działają trująco na komórki bakteryjne. Najsilniejszy efekt bakteriobójczy promieni UV uzyskuje się w warunkach tlenowych, natomiast dodanie do środowiska związków obniżających potencjał oksydacyjno-re-

dukcyny (np. aminokwasu cysteiny) wpływa automatycznie na obniżenie efektu działania UV.

Z problemem zabicia bakterii wiąże się też zjawisko tzw. fotoreaktywacji. Stwierdzono mianowicie, że wśród bakterii napromieniowanych dawkami promieni UV, a następnie wystawionymi na działanie światła widzialnego, przeżywalność jest znacznie większa, a ilość mutantów znacznie mniejsza, niż u bakterii, które poddawane były jedynie promieniowaniu ultrafioletowemu. Nazwano to fotoreaktywacją. Stwierdzono także, że w bakteriach fotoreaktywowanych powstaje specjalny enzym, który zdolny jest do wycinania z łańcucha polinukleotydowego dimerów tyminy, a następnie brakujące zasady są ponownie wbudowywane w cząsteczkę kwasu nukleinowego.

Skuteczność dezynfekcji za pomocą UV zależy więc nie tylko od dawki promieniowania, ale także od specyficznej odporności organizmów na jego działanie. Do dezaktywacji różnych mikroorganizmów niezbędne są różne dawki promieniowania UV, przy czym dawki te dla danego mikroorganizmu są także różne w zależności od tego, czy uwzględniają reaktywację (gdy występuje pod wpływem światła słonecznego to jest to fotoreaktywacja) mikroorganizmów, czy też nie. Fotoreaktywacja polega na odbudowie zniszczonej przez ultrafiolet struktury DNA w obecności odpowiednich enzymów. Istotny wpływ na reaktywację mają zatem enzymy komórkowe. Dlatego bardzo ważne jest niszczenie enzymów, które zapewnia ultrafiolet o długości fali 280 nm. Ultrafiolet o długości 254 nm nie posiada tej zdolności. Oznacza to, że lampy UV niskociśnieniowe emitujące światło monochromatyczne o długości fali 254 nm w całym zakresie UV-C nie mają możliwości zniszczenia enzymów i dlatego ich skuteczność dezynfekcyjna jest ograniczona.

Promieniowanie ultrafioletowe w zakresie od 254 do 265 nm (UV-C) powoduje błyskawiczną reakcję fotochemiczną w kwasie DNA, który decyduje o życiu wszystkich mikroorganizmów. Dzięki tej reakcji mikroorganizmy albo zostają zabite, albo też tracą zdolność rozmnażania się.

Dezynfekcja za pomocą promieniowania UV stanowi najlepszą, wypróbowaną, akceptowaną i ekologiczną metodę dezynfekcji ścieków, dającą wysokie efekty w przypadku ścieków dobrze oczyszczonych. Obecność w ściekach cząstek stałych i zawiesiny wpływa na obniżenie efektywności procesu dezynfekcji promieniami UV. Według doniesień literaturowych [3] istnieje graniczny wymiar cząstek poniżej którego cząstki nie obniżają efektywności promieniowania, które bez przeszkód dociera do mikroorganizmów. Graniczny wymiar cząstek jest rzędu 10  $\mu\text{m}$  i jest wielkością specyficzną dla danego rodzaju ścieków. Aby zapewnić dobry efekt dezynfekcji promieniami UV należy monitorować wartość mętności i zawiesin w ściekach poddawanych dezynfekcji.

### **Filtracja membranowa**

Mikro i ultrafiltracja gwarantują wysoki stopień separacji bakterii i substancji stałych. Wirusy posiadają zdolność do adsorpcji na substancjach stałych, a za pomo-

cą membran można znacznie obniżyć ich ilość. Do dezynfekcji ścieków wystarcza średnia wielkość porów membrany rzędu  $0,2 \mu\text{m}$ . Ta metoda dezynfekcji polecana jest szczególnie w istniejących biologicznych oczyszczalniach ścieków.

### **Promieniowanie jonizujące (dezynfekcja radiacyjna)**

Całkowite wyjałowienie osadów można uzyskać stosując wiązki przyśpieszonych elektronów oraz promieniowanie radiacyjne. Metody te są dość drogie pod względem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, niemniej są stosowane w takich krajach jak: Niemcy, USA i Kanada. Wiązki elektronów stosowane są do wyjaławiania osadów ciekłych, a promieniowanie radiacyjne do ciekłych, odwodnionych i suchych. Źródłem promieniowania jonizującego (promienie X i gamma) są liniowe akceleratory elektronów (10%) lub izotopy promieniotwórcze (90%), głównie Co-60, rzadziej Cs-137. Zaletą metody jest krótki czas sterylizacji (kilka minut ekspozycji daje spadek liczby mikroorganizmów o 6-7 rzędów wielkości), temperatura zbliżona do pokojowej oraz brak pozostałości toksycznych w sterylizowanym materiale. Efekt działania tego promieniowania określany jest wartością D10 (wartość redukcji dziesiętnej, ang. *decimal reduction value*), czyli dawką promieniowania niezbędną do zabicia 90% komórek.

Główną wadą dezynfekcji ścieków promieniami gamma są wysokie koszty, konieczność zachowania odpowiednich środków bezpieczeństwa oraz brak szerokiej wiedzy praktycznej w stosowaniu tej metody, co utrudnia projektowanie.

### **Ultradźwięki**

Ultradźwięki, czyli drgania o częstotliwości  $20\div 100 \text{ kHz}$ , to wibracje dźwiękowe, które powodują przerwanie ciągłości osłon komórkowych. Skuteczność dezynfekcji ultradźwiękami zależy od natężenia, częstotliwości oraz czasu działania ultradźwięków oraz rodzaju i liczby niszczonego mikroorganizmów. Ultradźwięki nie zabezpieczają środowiska przed wtórnym rozwojem mikroorganizmów, dlatego też muszą być stosowane wraz z innymi dezynfektantami, np. chemicznymi. Obecnie zastosowanie ultradźwięków nie wyszło poza sferę badań laboratoryjnych i półtechnicznych [2].

### **Termiczne suszenie**

Suszenie osadów ściekowych jest procesem pozwalającym na przekształcenie osadu w produkt o określonych parametrach ułatwiających jego przyrodnicze wykorzystanie lub ostateczne unieszkodliwienie metodami termicznymi. W wyniku termicznego suszenia uzyskuje się osad o zawartości od 50 do ponad 90% s.m. Osad ten może następnie zostać spalony. Źródłem ciepła do suszenia może być: olej i woda z chłodzenia generatorów, para niskociśnieniowa, ciepło z ciepłowni miejskiej i gazy spalinowe z procesów spalania. Wentylatory wymuszające cyrkulację ciepłego powietrza poprzez osad wzmacniają efekt odparowania cieczy. Proces suszenia

może być niskotemperaturowy lub wysokotemperaturowy. Temperatura procesu poniżej 180 °C zapobiega jednak spiekaniu osadu. Proces suszenia może odbywać się w urządzeniach mechanicznych (suszarki bębnowe, tarczowe, powietrzne) lub wykorzystuje się energię promieniowania słonecznego.

## CHEMICZNE METODY DEZYNFEKCJI

### Ozonowanie

Ozon jest najbardziej skutecznym środkiem dezynfekcyjnym i niszczy bakterie szybciej niż chlor. Bakteriobójcze działanie ozonu polega na zwiększeniu przepuszczalności ściany i błony komórkowej na skutek ozonolizy nienasyconych kwasów tłuszczowych występujących w lipidach [7]. Powoduje to rozpad cząsteczki w miejscu podwójnego wiązania między atomami węgla na fragmenty o krótszym łańcuchu. Lipidy występujące w błonie komórkowej posiadają około  $10^6$  podwójnych wiązań. Wnikający do cytoplazmy ozon niszczy struktury wewnątrzkomórkowe, głównie kwasy nukleinowe [5,12]. Ozon skuteczniej od chloru niszczy także wirusy.

Ozonowanie substancji organicznych wywołuje powstawanie nadtlenków, posiadających wysoką aktywność biochemiczną [14]. W wyniku reakcji ozonu z wielonienasyconymi kwasami tłuszczowymi dochodzi do ich peroksydacji. W ten sposób dochodzi do zmian w strukturze błon komórkowych i ich uszkodzenia. Jednym z ważniejszych działań ozonu na metabolizm komórkowy jest jego wpływ na koenzymy NADH i NADPH, powodując ich utlenienie. Koenzymy te biorą udział w licznych reakcjach syntezy i rozkładu, np. w procesach oddechowych i syntezie kwasów tłuszczowych.

Różne bakterie wykazują odmienną wrażliwość na ozon. Bakterie Gram-ujemne są mniej wrażliwe niż bakterie Gram-dodatnie. Również bakterie posiadające otoczkę są bardziej odporne na działanie ozonu.

Dezynfekcja ścieków miejskich ozonem ( $O_3$ ) w warunkach polskich nie jest stosowana, z uwagi na zbyt wysokie koszty. Rozwój techniki może jednak w najbliższym czasie uczynić wybór ozonu jako dezynfektanta ścieków bardziej ekonomicznie uzasadnionym. Ze względów technologicznych metoda ta może być ze wszelkich miar polecana. Jej zalety wynikają z silnych właściwości utleniających ozonu. Jako środek bakteriobójczy, ozon jest ponad dwukrotnie bardziej aktywny niż chlor. Efektywnie niszczy wirusy, pod wpływem ozonu znacznie szybciej giną drożdże, zarodniki grzybów i cysty. Ozon niszczy ponadto szereg związków uważanych za rakotwórcze, np. wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), a także stosowany jest do usuwania zapachu i związków refrakcyjnych.

Dawki ozonu dla ścieków biologicznie oczyszczonych są w przedziale od 15 do 30 mg  $O_3/dm^3$ , a czas kontaktu ścieków z ozonem wynosi około 15÷20 minut [2].



## Chlorowanie

Dezynfekcja chlorem jest metodą najtańszą i najbardziej rozpowszechnioną. Zastosowanie do tego celu dwutlenku chloru jest już znacznie droższe i technologicznie bardziej złożone. Efekt dezynfekcji zależy głównie od składu ścieków, dawki chloru, odczynu (pH), temperatury, czasu kontaktu, rodzaju i liczby drobnoustrojów. Przy wzroście odczynu, obniżeniu temperatury ścieków, zmniejszeniu dawki i czasu kontaktu efekty dezynfekcji maleją.

Działanie chloru na komórkę bakteryjną wyjaśnić można reakcją chemiczną HOCl z enzymami komórki, decydującymi o metabolizmie bakterii [4]. Chlor atakuje prawdopodobnie enzym dehydrogenazę fosfotriozy, występujący prawie we wszystkich komórkach i będący ważnym czynnikiem w procesie utleniania glukozy w komórce. Enzym ten jest szczególnie wrażliwy na utleniające działanie chloru, który reaguje z jego grupami sulfhydrylowymi, utleniając je do grup dwusiarczkowych, co powoduje blokadę enzymu. Teoria ta nie daje jednak pełnej odpowiedzi na chemizm bakteriobójczego działania chloru, gdyż enzymy wyodrębnione z komórki są jednakowo podatne na działanie różnych środków utleniających, jak np.  $H_2O_2$  i  $KMnO_4$ , które to związki działają na komórki bakteryjne znacznie słabiej niż chlor. Wynika stąd, że muszą tu działać jeszcze inne czynniki, jak np. prędkość dyfuzji środka dezynfekującego poprzez ścianę i błonę komórkową, która to prędkość decyduje o stężeniu tego środka wewnątrz komórki [6]. Tak więc nie tyle siła utleniająca HOCl decyduje o jego przewadze nad innymi utleniaczami, ile mały wymiar jego cząsteczki i obojętność elektryczna.

Białka występujące w każdej komórce mają charakter amfoteryczny, zawierają ujemne grupy karboksylowe i dodatnie grupy aminowe. Przyjmując, że większość grup karboksylowych jest związana oraz, że istnieje przewaga grup aminowych, otrzymuje się ogólny dodatni ładunek komórki bakteryjnej. W roztworach o wyższej wartości odczynu pH część tego ładunku zostaje zobojętniona. Obojętna cząsteczka HOCl może więc przeniknąć przez błonę komórkową bez oporów, natomiast ujemnie naładowany jon  $OCl^-$  zostaje rozładowany dodatnim ładunkiem komórki, w wyniku czego powstaje obojętny HOCl i obojętne grupy  $R \cdot NH_2$ . Dopiero wtedy powstały z jonu  $OCl^-$  kwas podchloryny może wnikać do wnętrza komórki i wywierać działanie bakteriobójcze, np. przez zaatakowanie ważnych życiowo enzymów.

Dawki chloru przewidziane dla dezynfekcji ścieków miejskich najczęściej nie niszczą form przetrwalnikowych bakterii oraz jaj robaków pasożytniczych. Niekiedy obserwuje się stymulujące działanie chloru na rozwój jaj do stadium inwazyjnego. Dezynfekcja chlorem jest aktualnie najczęściej stosowaną metodą dezynfekcji awaryjnej. Z uwagi na powstawanie związków chloroorganicznych ciągła dezynfekcja ścieków komunalnych związkami chloru nie powinna być stosowana.

Do dezynfekcji ścieków i osadów ściekowych stosuje się najczęściej:

- Wapno chlorowane – inaczej: chloran (I) wapnia, podchloryn wapnia, wapno bielące, chlorek bielący, calcium hypochlorite, hydratem,

- Wodorotlenek wapnia, inaczej wapno hydratyzowane, wapno gaszone –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,
- Podchloryn wapniowy –  $\text{Ca}(\text{ClO})_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ ,
- Podchloryn sodowy  $\text{NaClO} \times 5\text{H}_2\text{O}$ ,
- Chlor –  $\text{Cl}_2$  (najczęściej w postaci wody chlorowej),
- Dwutlenek chloru –  $\text{ClO}_2$ ,
- Tlenek wapnia, inaczej wapno palone –  $\text{CaO}$ .

Wapno chlorowane i podchloryn wapniowy stosuje się zwykle w małych oczyszczalniach ścieków oraz do dezynfekcji skrętek, piasku z piaskowników i osadów, w szczególności osadów surowych [2].

### **Kwas nadoctowy**

Kwas nadoctowy w skali technicznej jest stosowany na oczyszczalniach ścieków miejskich w Wielkiej Brytanii, Finlandii, Brazylii, Kanadzie oraz we Włoszech. Kwas nadoctowy jest uważany za skuteczny dezynfektant do zwalczania bakterii, wirusów, grzybów i przetrwalników. Jest substancją o silnych właściwościach utleniających i potencjałe oksydacyjnym wyższym od potencjału chloru i dwutlenku chloru.

Do zalet kwasu nadoctowego, obok wysokiej efektywności unieszkodliwiania bakterii i wirusów i niskiego poziomu powstawania produktów ubocznych, należy zaliczyć brak wpływu wartości odczynu pH na efektywność procesu oraz wymagany krótki czas kontaktu.

Produktem rozkładu kwasu nadoctowego jest kwas octowy, będący związkiem łatwo biodegradowalnym. Cecha ta powoduje niebezpieczeństwo wtórnego rozwoju drobnoustrojów w ściekach bez resztkowego kwasu nadoctowego.

### **Alternatywne sposoby dezynfekcji ścieków**

Obecnie prowadzone są badania nad alternatywnymi metodami dezynfekcji ścieków. Do metod tych należy zaliczyć metodę PEROXONE, która polega na dawkowaniu do ozonowanych ścieków nadtlenku wodoru. PEROXONE jest metodą zaawansowanego utleniania o wysokiej efektywności unieszkodliwiania patogenów.

Innym kierunkiem poszukiwań są badania nad stosowaniem kombinacji dezynfektantów, których ilość i dawki są określane dla danego rodzaju ścieków na podstawie badań pilotowych. Kryterium doboru metody jest skuteczność eliminacji mikroorganizmów i minimalizacja powstawania produktów ubocznych. Stwierdzono, że zastosowanie kilku dezynfektantów daje wyższą efektywność dezynfekcji, która jest efektem synergicznego działania stosowanych środków.

## **DEZYNFEKCJA ŚCIEKÓW – PRAKTYKA W KRAJU I ZA GRANICĄ**

W praktyce eksploatacyjnej stosuje się dezynfekcję:

- ścieków i osadów ściekowych przed ich wykorzystaniem rolniczym,

- ścieków zakaźnych z zakładów lecznictwa zamkniętego i obiektów, w których są leczeni chorzy na choroby zakaźne,
- ścieków ze stacji krwiodawstwa,
- ścieków z zakładów leczniczych dla zwierząt, w których zwierzęta są leczone stacjonarnie na choroby zakaźne,
- ścieków z laboratoriów prowadzących badania z materiałem zakaźnym pochodzącym od zwierząt,
- ścieków przemysłowych z garbarni, rzeźni i zakładów utylizacyjnych,
- ścieków miejskich wskutek zarządzenia władz sanitarnych m.in. w związku z wybuchem epidemii,
- ścieków miejskich w okresie awarii podstawowych obiektów oczyszczalni ścieków,
- ścieków miejskich w okresie zbyt niskich stanów wody w odbiorniku,
- skratek zatrzymanych na kratkach i piasku usuwanego z piaskowników,
- ścieków z instytutów badawczych inżynierii genetycznej i organizmów genetycznie zmodyfikowanych (GMO),
- ścieków z laboratoriów mikrobiologicznych,
- ścieków z instytutów badawczych i zakładów hodowli zwierząt laboratoryjnych (doświadczalnych),
- ścieków odprowadzanych do wód w sąsiedztwie plaż, kąpielisk i ujęć wodnych,
- niektórych osadów ściekowych.

Ciągła dezynfekcja oczyszczonych ścieków w prawidłowo eksploatowanych oczyszczalniach ścieków komunalnych (mechaniczno-biologicznych) nie jest z zasady w Polsce stosowana. W świetle praktyki zagranicznej (szczególnie w USA) wydaje się jednak w wielu przypadkach celowe stosowanie dezynfekcji ciągłej, przynajmniej w pewnych porach roku.

Niektóre z krajów europejskich wprowadziły przynajmniej częściową dezynfekcję ścieków odprowadzanych z oczyszczalni. W Niemczech dezynfekuje się ścieki odprowadzane na tereny rekreacyjne. We Francji dezynfekuje się zrzuty ścieków na obszarach chronionych, takich jak kąpieliska i tereny hodowli mięczaków. W Hiszpanii dezynfekowane są ścieki do nawodnień rolniczych, drzew owocowych, pól sportowych i ogrodów.

Przeciętny odpływ z biologicznej oczyszczalni ścieków zawiera od kilkuset tysięcy do około miliona bakterii grupy coli w 100 ml. Łączna liczebność wszystkich bakterii odprowadzanych do odbiornika jest już tylko funkcją natężenia przepływu oczyszczonych ścieków. Brak ciągłej dezynfekcji na odpływach oczyszczalni powoduje, że odbiorniki oczyszczonych ścieków (najczęściej rzeki), mimo uzyskiwania zadowolających wskaźników fizyko-chemicznych, są przeważnie pozaklasowe, co wynika z przekroczenia wskaźników mikrobiologicznych.

Poważny problem związany z dezynfekcją ścieków dotyczy m.in. szpitali, głównie tych, w których są leczeni chorzy na choroby zakaźne. Drobnoustroje szpitalne to

często mutacje odporne na antybiotyki, dlatego są śmiertelnie niebezpieczne. Analiza ścieków szpitalnych odprowadzanych do kanalizacji wykazuje, że zawierają one m.in.: bakterie coli, enterokoki, wirusy żółtaczki, a nawet HIV i substancje radioaktywne. Drobnoustroje te trafiają do oczyszczalni ścieków, ale tam nie są zabijane i w konsekwencji wpływają do rzek, powodując zanieczyszczenie wód powierzchniowych.

W 1997 roku Ministerstwo Zdrowia nakazało, aby wszystkie szpitale w Polsce oczyszczały swoje ścieki. Prawo, ze względu na tragiczną kondycję finansową placówek, złagodzone w 2001 roku. Nowe przepisy nakładają obowiązek dezynfekcji nieczystości jedynie na lecznice zakaźne i takie, które mają tego typu oddziały [15,16].

Kontrole Głównego Inspektora Sanitarnego w Polsce wykazują, iż nie wszystkie placówki wykonują ten obowiązek. Wg danych z końca 2008 roku co piąty szpital zakaźny nie dezynfekował ścieków. Pierwsza w Polsce nowoczesna stacja dezynfekcji ścieków szpitalnych została otwarta pod koniec 2008 roku w Pomorskim Centrum Chorób Zakaźnych i Gruźlicy (PCCChZiG) w Gdańsku. Zastosowane tu rozwiązanie technologiczne do dezynfekcji ścieków za pomocą lamp ultrafioletowych (UV) jest pierwszym w kraju i niewykluczone, że też w Europie. Według badań i założeń prowadzonych w tej placówce stwierdza się, że dzięki naświetlaniu lampami UV zostanie zniszczonych prawie 100 % bakterii i wirusów występujących w ściekach.

Ścieki komunalne mogą powodować także skażenie plaż i kąpielisk oraz infekcje uszu i oczu podczas kąpieli oraz nurkowania. Z tego względu bardzo ważne jest efektywne oczyszczenie ścieków w oczyszczalniach. W przypadkach szczególnej ochrony odbiornika ścieków, np. wód morskich w sąsiedztwie plaż i kąpielisk, a także ujęć wodnych dla zaopatrzenia miast lub przemysłu spożywczego stosuje się na świecie dodatkowo dezynfekcję ścieków oczyszczonych. Do dezynfekcji odpływów z oczyszczalni w sąsiedztwie plaż m.in. w Chinach, Francji i USA stosuje się dwutlenek chloru. Stosowane są tutaj zwykle niskie dawki tego związku ( $2-5 \text{ mg/dm}^3$ ) oraz krótki czas kontaktu ( $t = 5-15$  minut). Znane są także przypadki dezynfekcji ścieków oczyszczonych promieniami UV, np. w Monachium, gdzie dezynfekcję ścieków prowadzi się dla utrzymania bezpieczeństwa sanitarnego naturalnego kąpieliska miejskiego, zlokalizowanego na rzece Isaar, poniżej odpływu ścieków oczyszczonych z tego obiektu [9].

Najbardziej restrykcyjne prawo dotyczące dezynfekcji ścieków w Stanach Zjednoczonych opracowane zostało przez Stanowy Departament Zdrowia Publicznego w Kalifornii. Skuteczność dezynfekcji ścieków ocenia się w oparciu o MPN (NPL – najbardziej prawdopodobna liczba) bakterii coli, oznaczona wg Standard Methods. Przykładowo woda oceanu lub zatoki ze słoną wodą, pobierana do badań, w 80% prób nie powinna zawierać więcej niż 1000 bakterii coli w 100 ml. Tak restrykcyjne prawo ma na celu ochronę terenów rekreacyjnych Kalifornii, które rozciągają się na długości 720 mil wybrzeża. [11]

Koncepcja norm opracowanych w Kalifornii, zakładająca eliminację zagrożeń zdrowia publicznego, opiera się na następujących założeniach:

- wartości graniczne wskaźników zanieczyszczeń wód naturalnych, przeznaczonych na rekreację, powinny być 500 razy wyższe od wskaźników wody do picia,
- zachowanie tych wartości eliminuje ryzyko wystąpienia zachorowań,
- ewentualne przekroczenia tych wartości w wodach słonych zdarzają się tylko w przypadku nagłych skażeń wód.

Przyjęcie tych założeń przekłada się na wymagania stawiane procesowi dezynfekcji ścieków. Wymagania te nakazują zachowanie wartości pozostałego chloru, po określonym czasie kontaktu, w ilości zapewniającej wartość wskaźnika na poziomie wymaganym w odbiorniku ścieków. Początkowo uważano, że zapewnienie 30 minutowego czasu kontaktu przy zachowaniu 0,5-0,75 mg/l chloru pozostałego powinno gwarantować uzyskanie oczekiwanego efektu. Jednak praktyka pokazała, że w różnych oczyszczalniach ścieków osiągnano różne efekty. Dlatego kryterium efektywności dezynfekcji ścieków określono w odniesieniu do bezpośredniego pomiaru liczby bakterii coli w odpływie.

Przedstawione przykłady dezynfekcji ścieków wskazują, że procedury takie mogą i powinny być stosowane także u nas w Polsce. Efektem dezynfekcji ścieków byłaby na pewno poprawa jakości wód powierzchniowych, których obecny stan jest niezadowolający. Można tylko zadać sobie pytanie: o ile wzrośnie cena ścieków, gdy zastosuje się ich dezynfekcję?

## PODSUMOWANIE

Dezynfekcję ścieków można prowadzić metodami fizycznymi, np. przez zastosowanie promieniowania UV, pasteryzacji, czy promieniowania jonizującego oraz metodami chemicznymi, głównie przez chlorowanie lub ozonowanie. W praktyce dezynfekcję ścieków i osadów ściekowych przeprowadza się najczęściej przez użycie związków chloru. Wyboru związku chloru, jak i jego dawki dokonuje się zwykle na drodze doświadczałnej. Jest to konieczne, ponieważ wirusy, bakterie, grzyby, pierwotniaki (protisty) i robaki pasożytnicze wykazują odmienną oporność na poszczególne środki dezynfekcyjne. Skuteczność dezynfekcji ścieków opiera się na kontroli stanu sanitarnego odbiorników ścieków, którymi najczęściej są wody powierzchniowe.

Dezynfekcję ścieków należy uznać za element konieczny w kontroli zagrożeń zdrowia publicznego. Efektywność naturalnych procesów ochrony wód jest często ograniczona przez wzrost populacji, wzrost migracji, rozwój terenów rekreacyjnych oraz wzrost ilości produkowanych ścieków. Wymaga to podniesienia efektywności procesów oczyszczania a wprowadzenie procesu dezynfekcji jest ostatnią barierą zabezpieczającą przed rozprzestrzenianiem się chorób przenoszonych drogą wodną.

Zarówno w Polsce, jak i na całym świecie istnieją liczne przepisy dotyczące stanu sanitarnego ścieków, osadów i wody. Dezynfekcja ścieków w krajach Europy Zachodniej i w USA ma długą tradycję. Jest procesem standardowo stosowanym w oczyszczaniu

ścieków ze szpitali i ścieków odprowadzanych do wód terenów rekreacyjnych. Z kontroli Inspekcji Sanitarnej wynika, że w Polsce nie wszystkie szpitale wywiązują się z nałożonego na nie obowiązku dezynfekcji ścieków. Problem tkwi nie tylko w zainstalowaniu odpowiednich urządzeń do dezynfekcji. Konieczne jest ustalenie optymalnej metody i stała kontrola parametrów i efektów procesu dezynfekcji ścieków.

## BIBLIOGRAFIA

1. Dudkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L. 1999. Klasyfikacja szkodliwych czynników biologicznych występujących w środowisku pracy oraz narażonych na nie grup zawodowych. Instytut Medycyny Wsi.
2. Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M. 1997. Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. PZITS, Poznań.
3. Emerick R.W., Loge F.J., Ginn T., Darby J.L. 2000. Modeling the inactivation of particle-associated coliform bacteria. Water Environment Research, 72, 4, 432-438.
4. Green D.E., Stumpf P.K. 1946. The mode of action of chlorine. J. Am. Water Works Assoc., 38, 1301-1308.
5. Hamelin C., Chung Y.S. 1978. Role of the pol, rec and dna gene product in the repair of lesions produced in Escherichia coli DNA by ozone. Studia Biophysica, 68, 229-235.
6. Knox W.E., Stumpf P.K., Green D.E., Auerbach V.H. 1948. The inhibition of sulfhydryl enzymes as the basis of the bactericidal action of chlorine. J. Bacteriol., 55, 451-458.
7. Kowal A.L., Świdarska-Bróż M. 2000. Oczyszczanie wody. PWN Warszawa-Wrocław.
8. Kunicki-Goldfinger W. 1971. Życie bakterii. PWN Warszawa.
9. Malej J. 2008. Wysoko sprawne oczyszczalnie ścieków a zagrożenia kąpielisk publicznych. Wodociągi - Kanalizacja, 57 (11), 48-49.
10. Marcinkowski T. 1986. Niszczenie organizmów chorobotwórczych w procesach przeróbki osadów ściekowych. Ochrona środowiska, 488/4 (30), 31-34.
11. Metcalf & Eddy. 2004. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. IV edition.
12. Roy D., Wong P.K., Engelbrecht R.S., Chian E.S. 1981. Mechanism of enteroviral inactivation by ozone. Appl Environ Microbiol., 41(3), 718-723.
13. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22.04.2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki. Dz.U. Nr 81, poz. 716.
14. Szaflik J. 2000. Ozon - wróg czy przyjaciel? internet: <http://psrp.idn.org.pl/ozon.html>
15. Ustawa z dnia 22 kwietnia 2005 r. „O zmianie ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków oraz niektórych innych ustaw”, Dz. U. Nr 85, poz. 729 z dnia 16 maja 2005 r.
16. Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. „O zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków”, Dz. U. Nr 72, poz. 747 z dnia 13 lipca 2001 r.

## WASTEWATER DISINFECTION

**Abstract.** In the article the necessity of wastewater disinfection is discussed, in the aspect of public health protection and treated sewage requirements. The methods of wastewater disinfection are presented. The regulations in Poland and abroad are discussed as well as practice in that matter.

**Keywords:** wastewater, disinfection.