

# Technologia wody i ścieków – tradycja i współczesność ujęcie syntetyczne

## Water and wastewater technology - Tradition and contemporary (present day) Synthetic approach

Zbysław Dymaczewski, Joanna Jeż-Walkowiak, Marek M. Sozański<sup>\*)</sup>

**Słowa kluczowe:** *Zdrowie publiczne, uzdatnianie wody, oczyszczanie ścieków, gospodarka wodno-ściekowa miast*

### Streszczenie

W artykule przedstawiono historię i genezę powstania centralnych systemów zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków. Zwrócono uwagę na pojawienie się pojęcia Zdrowia Publicznego sprzężonego ze stanem sanitarnym miast, co przyczyniło się do rozwoju miast i tym samym do rozwoju gospodarczego. W pracy zarysowane zostało powstanie i rozwój technologii uzdatniania wody i oczyszczania ścieków. W artykule scharakteryzowano aktualny stopień zaawansowania tych technologii. Autorzy przedstawili również prognozę dotyczącą dalszego rozwoju współczesnej gospodarki wodno-ściekowej w miastach.

**Keywords:** *Public health, water treatment, wastewater treatment, water and wastewater management in cities*

### Abstract

The article presents the history and genesis of the creation of central water supply and wastewater treatment systems. Attention was drawn to the emergence of the concept of Public Health linked to the sanitary condition of cities, which contributed to the development of cities and thus to economic development. The paper outlines the origin and development of water and wastewater treatment technologies. The article describes the current level of advancement of these technologies. The authors also presented a forecast concerning the further development of modern water and sewage management in cities.

Woda, jako podstawowa substancja niosąca życie i zdrowie, zawsze zajmowała szczególne miejsce w symbolice i rozwoju cywilizacji na przestrzeni minionych wieków. Stąd też wynika fundamentalna rola systemów zaopatrzenia w wodę oraz unieszkodliwiania ścieków, uzasadniająca przyjęcie rozwoju tych systemów jako kryterium oceny rozwoju cywilizacji i ochrony środowiska naturalnego. Koncepcja niniejszego artykułu, zgodnie z tematem, jest próbą syntetycznej oceny znaczenia technologii wody i ścieków z perspektywy rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę oraz usuwania i unieszkodliwiania ścieków, jako zintegrowanej dziedziny naukowej, określonej w obszarze trzech autonomicznych wektorów:

- wektora czasu i miejsca, określającego sekwencję i genezę powstania dziedziny z uwzględnieniem osiągnięć cywilizacji starożytnych,
- wektora metodologii rozwoju, jako funkcji stosowanych metod badawczych,
- wektora działań praktycznych – inżynierskich, jako działań zmierzających do zaspokojenia potrzeb człowieka, ale z perspektywy całej cywilizacji.

W artykule przedstawiono koncepcję metodologiczną technologii wody i ścieków, z uwzględnieniem sekwencji czasowej z perspektywy rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę oraz usuwania i unieszkodliwiania ścieków, opartą na założeniu stawianych celów i stosowanych metod.

## 1. Historia i geneza centralnego zaopatrzenia w wodę

W przekroju historycznym sposób rozwiązywania zaopatrzenia w wodę, a przez to i zakres w jakim realizowano postawiony cel, był oczywiście różny, uzależniony od stopnia rozwoju cywilizacji oraz uwarunkowań lokalnych i kulturowych. W czasach najdawniejszych zaopatrywano się w wodę czerpiąc ją bezpośrednio z rzek, kopiąc studnie, a także niekiedy zbierano wodę deszczową w specjalnie w tym celu wykonanych zbiornikach. Z tych też względów największe cywilizacje w starożytności powstały nad dużymi zbiornikami wodnymi, głównie nad rzekami i morzami. Dotyczyło to m. in. cywilizacji egipskiej, chińskiej, helleńskiej i rzymskiej.

Woda jest zatem substancją, której rozmieszczenie i dostępność na kuli ziemskiej miały decydujący wpływ na miejsce powstawania i rozwój wielu cywilizacji w starożytności. Gospodarka wodna obszarów, na których rozwinęły się wyżej wymienione cywilizacje, miała istotny wpływ na rozwój tych cywilizacji, jak również była skutkiem ich rozwoju. Najbardziej okazałymi budowlami wodociągowymi w starożytności były akwedukty, którymi sprowadzano wodę do miast, najczęściej bezpośrednio ze źródeł górskich (rys. 1). Na ogół pod pojęciem akweduktów rozumie się koryta wodociągowe.

<sup>\*)</sup> Zbysław Dymaczewski, dr hab. inż., prof. Politechniki Poznańskiej, Joanna Jeż-Walkowiak, dr hab. inż., prof. Politechniki Poznańskiej, Marek M. Sozański, prof. dr hab. inż. – Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

gowe prowadzone na arkadach. W rzeczywistości jedynie około 10% długości akweduktu umieszczono na arkadach, głównie przy pokonywaniu rzek i dolin.



Rys. 1. Skrzyżowanie akweduktów Rzymu – rekonstrukcja (obraz Z. Diemera w Deutsches Museum w Monachium).

Fig. 1. The intersection of the aqueducts of Rome – reconstruction (painting by Z. Diemer at the Deutsches Museum in Munich).

Wielokondygnacyjne arkady były budowlami wielkimi i pracochłonnymi, pozwalały jednak zachować stały spadek dna koryt oraz unikać wysokiego ciśnienia wody, co było istotne z uwagi na nieznaną pomp – urządzeń do podnoszenia cieczy oraz z uwagi na niewielką wytrzymałość mechaniczną stosowanych wówczas powszechnie rur ceramicznych i ołowianych. W cywilizacji rzymskiej osiągnięto najwyższy stopień rozwoju zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków. W starożytnym Rzymie, posiadającym około miliona mieszkańców, zużycie wody na jednego mieszkańca było teoretycznie wyższe niż w dzisiejszych miastach, a całkowita ilość dostarczanej wody wynosiła, zależnie od okresu, od 800 tys. do miliona m<sup>3</sup>/d. Najważniejsze cechy charakterystyczne systemu zaopatrzenia w wodę cesarstwa rzymskiego przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Wodociągi rzymskie

Table 1. Roman waterworks

L.p.	Wybrane cechy charakterystyczne
1.	Początek nowej ery – Rzym, miasto o populacji 1 mln mieszkańców
2.	Woda sprowadzana do Rzymu 11 akweduktami o łącznej długości ok. 500 km – najdłuższy ok. 91 km
3.	Dostarczana ilość wody ok. 800 – 1000 L/Mk/d
4.	Wodociąg pracuje w układzie otwartym
5.	Dystrybucja: pałac Cesarski, rezydencje bogatych Rzymian, zbiorniki retencyjne, fontanny, łaźnie miejskie, miejskie toalety
6.	Nadmiar wody doprowadzanej do Rzymu był odprowadzany do kanalizacji "Cloaca Maxima"
7.	Najdłuższy akwedukt 145 km: akwedukt "Serino" (6 m <sup>3</sup> /s) – zaopatrzał miasto Neapol
8.	Akwedukt "Cartagena" – 132 km – dzisiejsza Hiszpania

Należy jednak zauważyć, iż zaopatrzenie w wodę Rzymu i innych ówczesnych miast cesarstwa odbywało się na zasadzie stałego przepływu wody. Oznacza to, że niewykorzystana część wody odpływała do kanalizacji. Najbardziej znanym kanałem w starożytności był kanał rzymski o nazwie "Cloaca Maxima". Został on zbudowany z kamienia w 184 roku przed Chrystusem. Miał przekrój prostokątny z przesklepieniem u góry. Szerokość kanału wynosiła 3,2 m, a maksymalna wysokość 4,2 m, spadek wahał się w przedziale 1 – 30 promila. Kanał ten zbierał ścieki i wody deszczowe z całego miasta i był w sposób ciągły spłukiwany wodą wodociągową. Kanał ten, jak i wiele innych obiektów tego typu,

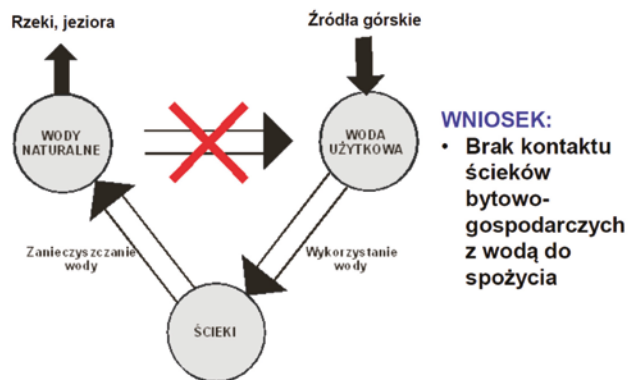
przetwał do dnia dzisiejszego i został częściowo włączony do współczesnego układu kanalizacyjnego miasta.

Po upadku Cesarstwa Rzymskiego w Europie standard życia, poziom sanitarny miast i higiena życia spadły do katastrofalnie niskiego poziomu, co wiązało się zarówno ze zburzeniem części akweduktów i kanalizacji oraz ich naturalnym niszczeniem na skutek braku konserwacji, a także powstawaniem nowych miast i osiedli niewyposażonych w żaden zorganizowany system wodociągowo-kanalizacyjny.

Zarówno w starożytności jak i obecnie, smak i zapach wody były i są podstawowymi kryteriami oceny jej jakości przez użytkowników. Pojęcie wody smacznej jest znacznie łatwiejsze, zarówno w powszechnym rozumieniu jak i naukowym ujęciu, od pojęcia wody zdrowej. Właściwości organoleptyczne wody, jako skutek oceny jej jakości poprzez zmysły, nie jest oczywiście wystarczającym kryterium. Klasycznym i bardzo pouczającym przykładem jest hipoteza historyków, według której upadek Cesarstwa Rzymskiego jest częściowo przypisywany przewlekłym zatruciom ludności, wywołanym stosowaniem rur ołowianych. Woda sprowadzana do Rzymu z gór akweduktami, zawierająca znaczne ilości CO<sub>2</sub> była smaczna, ale równocześnie w rurach ołowianych stawała się toksyczna rozpuszczając ołów, co nie wpływało w wyczuwalnym stopniu na zmianę jej właściwości organoleptycznych. Już Witruwiusz (I wiek p.n.e.) intuicyjnie zwracał uwagę, iż stosowanie rur ołowianych ze względów zdrowotnych nie jest wskazane.

Powszechnym zjawiskiem w czasach nowożytnych, nie obserwowanym na ogół w starożytności, było występowanie w Europie, jeszcze na początku XX wieku, epidemii wodnych, tzn. chorób zakaźnych, głównie układu pokarmowego, przenoszonych drogą wodną, co schematycznie wyjaśnia rys.2.

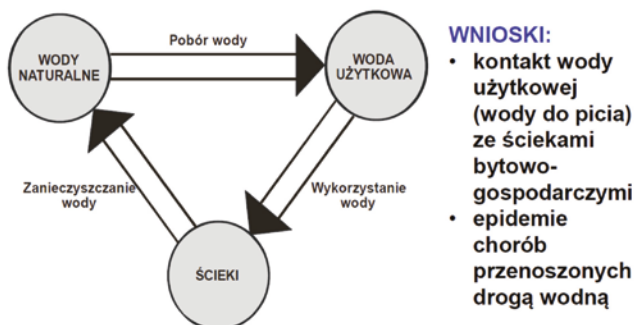
### Uproszczony schemat gospodarowania wodą w Cesarstwie Rzymskim



**WNIOSEK:**

- Brak kontaktu ścieków bytowo-gospodarczych z wodą do spożycia

### Uproszczony schemat gospodarowania wodą w Europie w wiekach średnich



**WNIOSKI:**

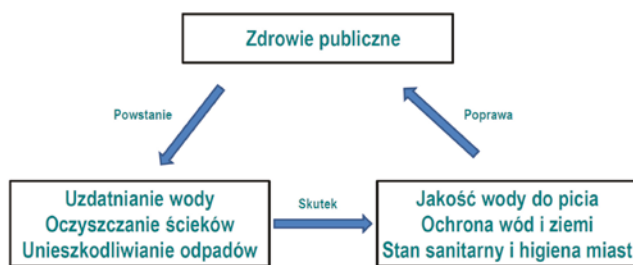
- kontakt wody użytkowej (wody do picia) ze ściekami bytowo-gospodarczymi
- epidemie chorób przenoszonych drogą wodną

Rys. 2. Schemat gospodarki wodno-ściekowej w miastach w cywilizacjach starożytnych i w Europie w wiekach średnich

Fig. 2. Diagram of water and sewage management in cities in ancient civilizations and in Europe in the middle ages

Koncepcja społeczeństwa wolnego od chorób jest oczywiście z biologicznego punktu widzenia utopią. To jednak działania późniejsze – na początku XX wieku, oparte na podstawach naukowych, zmierzające do:

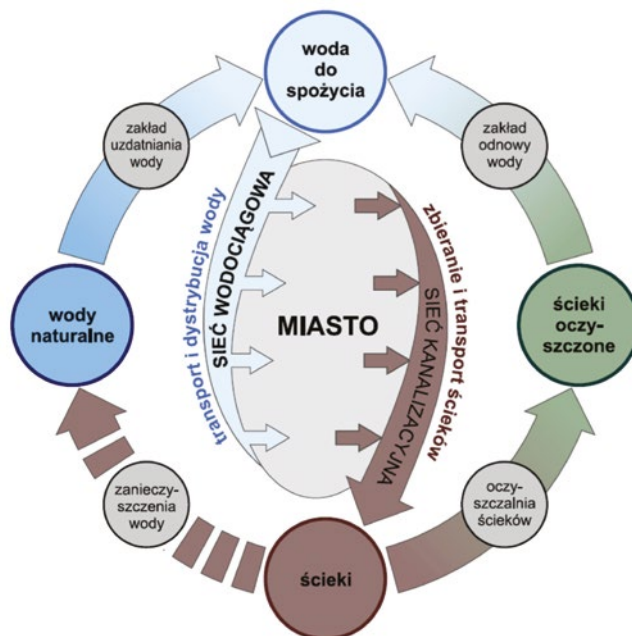
- uzdatniania wody – w szczególności jej dezynfekcji,
  - zbierania i odprowadzania z miast ścieków układem kanałów zamkniętych,
  - oraz oczyszczania ścieków
- w sposób radykalny poprawiło stan zdrowia publicznego, eliminując praktycznie epidemie wodne (rys. 3).



Rys. 3. Struktura warunków poprawy zdrowia publicznego  
Fig. 3. The structure of the conditions for improving public health

Studia i analizy nad identyfikacją przyczyn epidemii wodnych były w XIX wieku w Europie Zachodniej skrupulatnie prowadzone przez indywidualnych badaczy oraz oficjalnie do tego celu powołane komisje. Dotyczy to w szczególności Anglii, w której miały miejsce epidemie cholery m. in. w latach 1831-1832, 1848-1849 oraz 1853-1854. Dochodzenie przyczyn występowania tych epidemii prowadzone były metodą wnioskowania, opartą na analizie miejsca i czasu ich pojawiania się, rozprzestrzeniania oraz zaniku. Odkrycie przyczyn epidemii cholery, jako podstawowej epidemii „wodnej”, przypisuje się Johnowi Snow – angielskiemu lekarzowi anesteziologii. John Snow postawił hipotezę, iż przyczyną cholery, jako choroby przewodu pokarmowego, jest nieznan i niewidzialny żywy mikroorganizm, który jest przenoszony głównie drogą wodną. Hipotezę tę Snow udowodnił wyżej wspomnianą pośrednią metodą wnioskowania, analizując (w latach 1849 – 1855) zarówno przyczyny powstawania cholery jak i związki między rozprzestrzenieniem się tej choroby, a używanymi przez ludzi źródłami wody. W analizach tych szczególną rolę odegrały informacje dotyczące wybuchu epidemii cholery latem 1854 r. wśród ludzi zaopatrujących się w wodę ze studni wyposażonej w pompę na Broad Street w Londynie. Przyjęty przez Johna Snowa mechanizm pojawienia się i rozprzestrzeniania cholery w wyniku skażenia wody rzecznej ściekami bytowo-gospodarczymi, pozwolił na wyjaśnienie ówczesnych przypadków cholery także w innych dużych miastach Europy. Potwierdzenia słuszności hipotezy Johna Snowa już znacznie później w 1883 r. dokonał Robert Koch, identyfikując wskazany przez Snowa mikroorganizm jako *Vibrio cholerae*. Ostatecznie postęp dokonany w mikrobiologii i epidemiologii, a w szczególności odkrycia Ludwika Pasteura i Roberta Kocha, rozwiązały problem przyczyny epidemii wodnych, wskazując na metody ich zapobiegania. Osiągnięcia te stały się genezą zarówno rozwoju centralnego zaopatrzenia w wodę, jak i zbierania i oczyszczania ścieków na przełomie XIX i XX wieku w miastach najbardziej rozwiniętych krajów Europy oraz w USA. Oznaczało to zmianę już w tamtym okresie struktury systemów gospodarki wodno – ściekowej w miastach, do której na stałe wchodzi takie podsystemy jak zakłady uzdatniania wody i oczyszczalnie ścieków (rys. 4).

Tworzące się w tym okresie pojęcie Zdrowia Publicznego zawierało w sobie, jako element genezy, rodzącą się świadomość odpowiedzialności społeczeństwa za zwalczanie chorób (rys. 3). Przepisy dotyczące Zdrowia Publicznego jakie pojawiły się w tamtym czasie oraz radykalna poprawa tego zdrowia były w większym stopniu wynikiem ochro-



Rys. 4. Schemat gospodarki wodno-ściekowej w miastach po wprowadzeniu uzdatniania wody i oczyszczania ścieków (odnowę wody wprowadzono kilkadziesiąt lat później) [Dymaczewski, 2015]

Fig. 4. Diagram of water and wastewater management in cities after the introduction of water treatment and wastewater treatment (water renewal was introduced several dozen years later) [Dymaczewski, 2015]

ny sanitarnej i podniesienia higieny miast w wyniku ich centralnego zaopatrzenia w uzdatnioną wodę, a w mniejszym wynikiem działania służb medycznych.

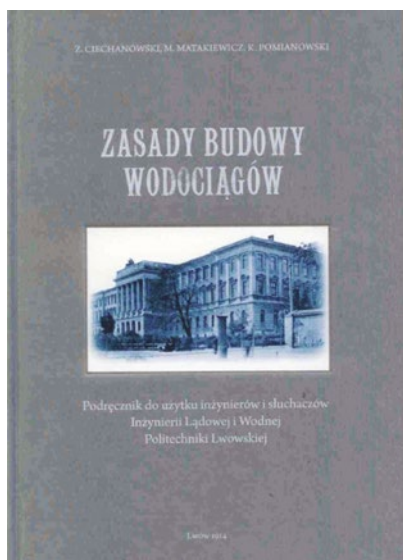
Rozwój centralnego zaopatrzenia w wodę na przełomie XIX i XX wieku w miastach Europy i Stanów Zjednoczonych był bardzo dynamiczny. Przykładowo w USA w roku 1900 było około 3200 miast posiadających centralne zaopatrzenie w wodę, natomiast w roku 1950 ilość takich miast wzrasta do około 15 000, zamieszkałych przez ponad 100 milionów ludzi. W tym też czasie, głównie w rozwiniętych krajach Europy Zachodniej i w Stanach Zjednoczonych, powstają pierwsze instytucje i zakłady kontroli środowiska szczebla państwowego i regionalnego. W Polsce niepodległej w 1923 r. powstaje Państwowy Zakład Higieny, a w dalszej kolejności jego oddziały w Krakowie, Poznaniu, Lwowie, w Wilnie, Toruniu, Łodzi, Lublinie, Gdyni, Katowicach, Zakopanem.

## 2. Powstanie i rozwój technologii uzdatniania wody i oczyszczania ścieków

### 2.1. Początki

Powstawanie i pierwszy etap rozwoju technologii wody i ścieków, trwający w przybliżeniu do lat 1920 – 1930, to głównie ciąg większych lub mniejszych odkryć, obserwacji i wniosków pojedynczych naukowców, opartych na doświadczeniach kierowanych intuicją i zdrowym rozsądkiem. Uzdatnianie wody i oczyszczanie ścieków w tym czasie było raczej umiejętnością niż nauką, a odkrycia wynikały z wyobraźni pojęciowej inżynierów i pomysłowości rzemieślników. Dopiero na początku XX wieku osiągnięcia te w większym stopniu stały się wynikami planowej pracy zespołowej, a metody stosowane w ówczesnych zakładach uzdatniania wody i oczyszczalniach ścieków zaczęły wchodzić do programów nauczania wyższych szkół technicznych, politechnik i uniwersytetów, głównie w ramach przedmiotów Higiena Miast, Inżynieria Sanitarna, Budownictwo Ogólne i Budownictwo Wodne. Wyjątkowym – pionierskim wydarzeniem w historii rozwoju dyscypliny było wydanie w 1914 r. przed pierwszą wojną światową

w Politechnice Lwowskiej podręcznika akademickiego pod tytułem „Zasady budowy wodociągów” (rys. 5). Autorami byli profesorowie tej uczelni Z. Ciechanowski, M. Matakiewicz, K. Pomianowski. Dzieło to ocenia się jako jedno z najlepszych opracowań tego tematu na świecie, w niczym nie odbiegające od prac ukazujących się w tamtym czasie w krajach o najbardziej wówczas rozwiniętych systemach wodociągowych (USA, Anglia, Niemcy). Wyjątkowa wartość tego dzieła wynika z kompleksowości, gruntowności i oryginalności ujęcia tematu obejmującego wszystkie elementy systemów zaopatrzenia w wodę czyli ujęcia, technologii uzdatniania wody i jej dystrybucji.



Rys. 5. „Zasady budowy wodociągów” – podręcznik z 1914 roku autorstwa profesorów Politechniki Lwowskiej, Z. Ciechanowskiego, M. Matakiewicza i K. Pomianowskiego.

Fig. 5. "Principles of building waterworks" - a textbook from 1914 written by professors of the Lviv Polytechnic, Z. Ciechanowski, M. Matakiewicz and K. Pomianowski.

Technologia wody i ścieków wdrażają w tym okresie do rozwiązań technicznych procesy występujące w środowisku naturalnym. Projektowane wówczas zakłady uzdatniania wód powierzchniowych (rys. 6) stosują procesy sedymentacji, infiltracji, a w szczególności filtracji powolnej zintegrowane z dezynfekcją prowadzoną metodą chlorowania.



Rys. 6. Koncepty technologiczne zakładów uzdatniania wód powierzchniowych stosowane na przełomie XIX i XX wieku

Fig. 6. Technological concepts of surface water treatment plants used at the turn of the 19th and 20th centuries

Integrację naturalnych procesów i dezynfekcji można wyjaśnić formułą operacyjną, opracowaną przy udziale Instytutu Ludwika Pasteura, określającą skuteczną dla dezynfekcji dawkę chloru przekraczającą o 0,1 – 0,3 mgCl<sub>2</sub>/L zapotrzebowanie chlorowe wody (ZChW) po 0,5 h czasie kontaktu. Dwuskładnikowa postać tej formuły ma określoną interpretację:

- pierwszy składnik definiowany jako chemiczny, określa zużycie chloru w czasie 30 minut we wszystkich reakcjach, w których utlenia on i chloruje związki organiczne i nieorganiczne znajdujące się w wodzie. Ten składnik mówi, że chlor reaguje w pierwszej kolejności chemicznie, a dopiero później dezynfekuje. Ta bezpieczna interpretacja sekwencyjnego działania chloru pokazuje, iż związki chemiczne reagujące z chlorem ochraniają drobnoustroje przed dezynfekcją, wreszcie, jak się okazało kilkadziesiąt lat później, wartość ZChW jest proporcjonalna do potencjału tworzenia się w danej wodzie ubocznych produktów dezynfekcji,

- drugi składnik formuły, określający dezynfekcyjne działanie chloru, podaje wartość stężenia chloru wolnego w granicach od 0,1 do 0,3 mgCl<sub>2</sub>/L przez okres 30 minut, jako niezbędną dla zniszczenia wegetatywnych form bakterii, powodujących tak zwane epidemie wodne, co było podstawowym celem dezynfekcji.

Takie zintegrowane, a zarazem bardzo skuteczne działanie procesów naturalnych, głównie filtracji powolnej oraz dezynfekcji metodą chlorowania w pierwszych systemach uzdatniania wody polegało:

- po pierwsze na efektywnym usuwaniu z wody drobnoustrojów już podczas filtracji powolnej,
- po drugie na intensyfikowaniu dezynfekcyjnego działania chloru przy równoczesnym obniżeniu jego dawki relatywnym do obniżenia ZChW.

Należy podkreślić, że chlor przez dziesiątki lat był niezawodnym środkiem dezynfekcyjnym i nadal nim jest, ale dotyczy to wód czystych o niskim ZChW. Zatem w wodach, w których chlor działa utleniająco i dezynfekcyjnie nie stwierdza się w zasadzie problemów eksploatacyjnych. Gdy zaczyna dominować chlorujące działanie chloru, głównie w wodach o wysokim ZChW – pojawiają się problemy, również w zakresie bezpieczeństwa wody do spożycia.

Do najbardziej znanych przykładów szkodliwego działania chloru zaliczamy:

- reakcje chloru (w formie kwasu podchlorynowego) z jonami amonowymi, w wyniku którego powstają chloraminy,
- reakcje chloru z fenolem (jednowodorotlenową pochodną benzenu), w wyniku której tworzą się jedno-, dwu – i trójchlorofenole (znaczne pogorszenie zapachu i smaku wody),
- reakcje chloru z prekursorami THM-ów (węglowodory, kwasy humusowe, metabolity glonów itp.), w efekcie których powstają trihalometany.

We wszystkich tych reakcjach oraz w wielu innych chlorujące działanie chloru negatywnie wpływa na jakość wody. Dotyczy to także chloramin, które w niektórych krajach, także w Polsce, są stosowane do dezynfekcji z uwagi na swoją trwałość, mimo iż są słabszymi dezynfektantami niż kwas podchlorynowy. Należy jednak podkreślić, że chloraminy mogą powodować pogorszenie smaku i zapachu wody, a wprowadzane do sieci wodociągowej mogą wywoływać procesy nityfikacji, przyspieszając tym samym sekwencję następujących procesów mikrobiologicznych w sieci. Z tego powodu ich stosowanie powinno być doświadczalnie uzasadnione. Idąc tym tropem myślowym dochodzimy do pojęcia ubocznych produktów dezynfekcji (samo pojęcie pojawiło się w technologii wody kilkadziesiąt lat później), które powstają we wszystkich stosowanych metodach dezynfekcji chemicznej i chemicznego utleniania, a więc nie tylko chlorem. Należy podkreślić, iż wszystkie uboczne produkty chemicznej dezynfekcji oraz chemicznego utleniania mają cechy odpadów rozpuszczonych w wodzie do spożycia, nawet gdy występują w ilościach dopuszczalnych. Wody podziemne, zabezpieczone geologicznie przed zanieczyszczeniami antropogenicznymi, są wolne od drobnoustrojów chorobotwórczych, od toksycznych mikrozanieczyszczeń i zanieczyszczeń organicznych. Wody te nie wymagają na ogół dezynfekcji.

Pierwsze oczyszczalnie ścieków składały się z prostych urządzeń służących do usuwania ciał pływających i zawiesin – oczyszczanie mechaniczne. Urządzenia te to głównie kraty i osadniki wstępne. Niska

efektywność tego typu oczyszczalni spowodowała ich rozbudowę o dalsze procesy i urządzenia. Pierwszymi oczyszczalniami, które wykorzystywały procesy biologiczne to oczyszczalnie ścieków w gruncie – pola nawadniane, pola irygowane. Zastosowano je po raz pierwszy w roku 1872 w USA. Oczyszczalnie ścieków w gruncie, z uwagi na wymagane znaczne powierzchnie oraz związane z tym koszty, zmusiły do poszukiwania metod bardziej efektywnych, o znacznie mniejszych wymaganiach terenowych. Pod koniec XIX wieku do biologicznego oczyszczania ścieków zastosowano złoża biologiczne. Początkowo stosowano złoża kontaktowe, wynalezione w roku 1891 przez W.J. Dibdina w Anglii. Datę tę uważa się za początek technologii biologicznego oczyszczania ścieków. W 1893 roku również w Anglii wprowadzono złoża zraszane, w dalszej kolejności wypierane stopniowo, począwszy od roku 1914, przez oczyszczalnie z osadem czynnym wynalezione przez Anglików Edwarda Arderna i Williama Locketta. Konkurencyjnymi urządzeniami dla osadu czynnego stały się w dalszej kolejności wysoko obciążone złoża sflukiwane wynalezione przez Helversona w 1936 r.

W Polsce budowa oczyszczalni ścieków była znacznie opóźniona w stosunku do budowy wodociągów zbiorowych i kanalizacji. Najlepsza pod tym względem była sytuacja na terenie ówczesnego zaboru pruskiego, gdzie pierwsze oczyszczalnie – mechaniczne lub biologiczne w postaci pól irygowanych – powstały pod koniec XIX i na początku XX wieku.

## 2.2 Rozwój

Spektakularnym czynnikiem, o istotnym znaczeniu dla rozwoju technologii wody i ścieków, miało powszechne wprowadzenie do programów kształcenia uniwersyteckiego kierunku inżynieria sanitarna. W Polsce wydziały inżynierii sanitarnej powstają w pierwszej kolejności (rok 1950) w Politechnice Warszawskiej, w Politechnice Wrocławskiej i w Politechnice Śląskiej. Twórcami programów nauczania są głównie profesorowie: Zygmunt Rudolf i Aleksander Szniolis, którzy jako młodzi naukowcy odpowiednio w latach 1922-1924 i 1924÷1926, będąc stypendystami fundacji Rockefellera, kończą studia na Uniwersytecie Harvarda w Cambridge w USA (rys. 7). Uniwersytet ten, jako pierwszy na świecie, rozpoczyna na Wydziale Budownictwa w latach 1900-1910 kształcenie w zakresie Inżynierii Zdrowia Publicznego – pierwowzoru inżynierii sanitarnej, a od roku 1910 już na osobnym Wydziale Inżynierii Sanitarnej.



Prof. Aleksander Szniolis



Prof. Zygmunt Rudolf

Rys. 7. Twórcy kierunku kształcenia Inżynierii Sanitarnej w Polsce

Fig. 7. Creators of the Sanitary Engineering training course in Poland

Po II wojnie światowej obserwuje się znaczne przyspieszenie w rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę oraz usuwania i unieszkodliwiania ścieków. Do najbardziej charakterystycznych trendów i kierunków tego rozwoju należy zaliczyć:

- umiędzynarodowienie problematyki jakości wody do picia, głównie przez jej włączenie w zakres działalności powstałej w 1946 roku Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), której

okresowo nowelizowane zalecenia rozszerzają i uściślają zakres limitowanych wskaźników i składników w oparciu o specjalistyczne i wieloletnie badania wpływu jakości wody na stan zdrowia publicznego,

- umiędzynarodowienie problematyki ochrony wód, a także wymagań stawianych oczyszczonym ściekom, dzięki aktom prawnym wydawanym przez poszczególne kraje, a w dalszej kolejności międzynarodowe organizacje (np. EWG, a obecnie UE),
- uruchomienie wielu kompleksowych programów badawczych i rozwojowych (głównie ze środków krajowych, społecznych, międzynarodowych i specjalnych fundacji) udostępniane oraz rozpowszechnione wyników podczas licznych konferencji oraz w monografiach i czasopismach,
- wzrost interdyscyplinarnego charakteru badań z zastosowaniem osiągnięć i metod biologii sanitarnej, hydrobiologii, mikrobiologii, chemii sanitarnej i analitycznej, ekotoksykologii, kinetyki i inżynierii chemicznej i biochemicznej, mechaniki cieczy, hydrologii, hydrogeologii, automatyki i informatyki,
- zwrot od jakościowego opisu zjawisk i procesów do ich matematycznej identyfikacji oraz dążenie do optymalizacji złożonych struktur technologicznych systemów uzdatniania wody i oczyszczania ścieków,
- identyfikację i wzrost efektów uzdatniania wody, przez zastosowanie procesów fizykochemicznych i chemicznych uzupełniających lub zastępujących procesy naturalne i biologiczne, w szczególności koagulacji, chemicznego utleniania i adsorpcji,
- intensyfikację efektów procesów i technologii oczyszczania ścieków, obejmujących nie tylko eliminację chorobotwórczych drobnoustrojów, obniżenie stężenia zawieszin, zawartości związków organicznych, usuwanie związków toksycznych i niepożądanych (np. fenoli, olejów, tłuszczów, substancji zapachowych, detergentów), a także obniżenie stężenia biogennych soli powodujących użyźnianie zbiorników wodnych,
- powstanie i rozwijanie nowej dyscypliny – technologii odnowy wody, mającej na celu odzyskiwanie z oczyszczonych ścieków wód charakteryzujących się właściwościami i składem, pozwalającym na ich wykorzystanie do celów przemysłowych, gospodarczych, a nawet do picia.

Intensywny rozwój systemów zaopatrzenia w wodę oraz systemów usuwania i unieszkodliwiania ścieków spowodował, że ich składowe elementy, takie jak:

- ujęcia wody,
- zakłady uzdatniania wody,
- sieci wodociągowe (układy dystrybucji wody),
- sieci kanalizacyjne,
- oczyszczalnie ścieków,

osiągają wszystkie cechy samodzielnych dyscyplin nauki z dziedziny inżynierii sanitarnej (a po roku 1970 – 1972 Inżynierii Środowiska), stając się przedmiotami autonomicznego wykładu i kierunku dyplomowania w uczelniach technicznych na całym świecie (tab. 2). W okresie tym dyscypliny te ulegają bardzo szybkiemu rozwojowi i transformacji, zarówno pod względem przedmiotowym, metodycznym jak i instytucjonalnym i administracyjnym – organizacyjnym. Dyscypliny te w szczególności wpłynęły na:

- strukturę wydziałów i instytutów inżynierii sanitarnej, wodociągów i kanalizacji, technologii wody i ścieków, a w dalszej kolejności inżynierii środowiska na uczelniach technicznych,
- powstanie wielu nowych czasopism naukowych i naukowo-technicznych, a także towarzystw, organizacji i komitetów naukowych i naukowo-technicznych krajowych, międzynarodowych, pozarządowych,
- wykładniczy wzrost w latach 1960-1980 ilości artykułów naukowych, monografii, książek, a także kongresów ogólnoswiatowych, międzynarodowych i krajowych konferencji poświęconych tej problematyce.

Tabela 2. Charakterystyka TUV i TOŚ jako autonomicznych dyscyplin nauki.

Table 2. Characteristics of water and wastewater treatment technologies as autonomous scientific disciplines

L.p.	Desygnaty i kryteria
1.	Przedmiot badania – dający formalnie wyróżnić zakres wiedzy teoretycznej i doświadczalnej, która nie redukuje się do pojęć i definicji biologii, chemii, fizyki, i która obejmuje metodycznie uporządkowany zbiór reakcji, procesów i systemów technologicznych, mających na celu zmianę jakości wód ujmowanych i ścieków oczyszczanych do poziomu stawianych wymagań
2.	Stopień rozwoju metod i narzędzi jako zorganizowany metodycznie system prowadzenia doświadczeń i badań naukowych, określonych przez aktualne i planowane kierunki rozwoju dyscyplin, w sensie przedmiotowym
3.	Przedmiot autonomicznego wykładu i kierunku dyplomowania
4.	Kształcenie kadry, nadawanie stopni naukowych i tytułu
5.	Poprzez tworzenie katedr, zakładów, zespołów – wpływa na strukturę instytutów i wydziałów inżynierii sanitarnej, przemianowych później na wydziały inżynierii środowiska
6.	Wpływa na organizację, planowanie i realizację badań oraz unifikację programów kształcenia, głównie wydziałów inżynierii środowiska.
7.	Wpływa na poziom, spójność i międzynarodowe powiązania ruchu naukowego – konferencje i kongresy, towarzystwa naukowe, czasopisma, książki, monografie naukowe i techniczne.

Ówczesny rozwój TUV i TOŚ był wynikiem:

- postępu dokonującego się w naukach podstawowych i technicznych, co warunkuje rozwój metod badań teoretycznych, eksperymentów doświadczalnych i technik pomiarowych,
- rosnących wymagań stawianych wodzie do picia i na potrzeby gospodarstwa oraz ściekom oczyszczonym, a także dążeniem do osiągnięcia optymalnych rozwiązań technologicznych,
- powstania wielkich aglomeracji miejskich i zakładów przemysłowych oraz budową relatywnie dużych systemów wodociągowych i kanalizacyjnych.

Należy podkreślić, iż ten okres rozwoju TUV i TOŚ, jako autonomicznych dyscyplin nauki, charakteryzował się w przybliżeniu wykładniczym wzrostem wartości wskaźników identyfikujących ten rozwój (tab. 3).

Tabela 3. Wskaźniki wykładniczego modelu rozwoju TUV i TOŚ

Table 3. Indicators of the exponential model of water and wastewater treatment technologies development

L.p.	Rozwój określony wykładniczym wzrostem:
1.	wydatków na prace B + R dyscypliny
2.	liczby pracowników naukowo-dydaktycznych (Politechniki, Uniwersytety) i naukowo-badawczych (Instytuty)
3.	liczby konferencji, kongresów
4.	wydawanych książek, podręczników, monografii naukowych
5.	wydawanych czasopism (tytuły, nakłady)
6.	liczby i wielkości programów i prac badawczych
7.	liczby prac doktorskich i habilitacyjnych
8.	liczby patentów i wynalazków

### 2.2.1. Technologia Uzdantniania Wody

Zakłady Uzdantniania Wody (ZUW) projektowane i budowane bezpośrednio po II wojnie światowej składają się z procesów:

**koagulacji – sedymentacji – filtracji pospiesznej – dezynfekcji**

W okresie do lat 1966-1970, a w Polsce do lat 1970 – 1987 w celu intensyfikacji efektów uzdatniania dokonywano wielu modyfikacji urządzeń i obiektów, jednak bez zmiany pierwotnej struktury technologicznej.

Modyfikacje te obejmowały:

- koagulację objętościową domieszek wody, prowadzoną w różnych zbiornikach mieszania i komorach flokulacji,
- koagulację powierzchniową realizowaną w różnego typu osadnikach z zawieszonym osadem lub w filtrach kontaktowych,
- sedymentację w osadnikach wielostrumieniowych,
- dezynfekcję ozonem, promieniami UV.

Efekty uzdatniania wody uzyskiwane w układach technologicznych. opartych na procesie koagulacji, uwarunkowane były głównie trafnym doborem:

- rodzaju i dawki koagulantu lub koagulantów,
- odczynu wody,
- rodzaju i dawek substancji wspomagających,
- kolejności dawkowania reagentów,
- parametrów mieszania reagentów z wodą (intensywność, czas),
- parametrów procesu flokulacji (gradient prędkości, czas),
- parametrów sedymentacji i filtracji.

Wymienione parametry procesowe są równocześnie podstawowymi czynnikami decyzyjnymi układów technologicznych, określanymi w projektowaniu, a także podczas ich eksploatacji, co w praktyce oznacza możliwość ich celowej i kontrolowanej zmiany dla maksymalizacji efektów uzdatniania. Dobór wartości tych parametrów jest uzależniony od składników i wskaźników wody ujmowanej i uzdatnionej, do których głównie należą:

- temperatura wody ujmowanej,
- skład fizyczno-chemiczny, bakteriologiczny i hydrobiologiczny wody ujmowanej,
- zmienność wskaźników jakości wody ujmowanej w cyklu rocznym,
- efekty uzdatniania określone wymaganiami stawianymi wodzie do picia.

Dopiero w latach 1970 – 1980 na zachodzie oraz w 1980 – 2000 w Polsce powstają programy modernizacji tej technologii, polegające głównie na jej rozszerzeniu o procesy chemicznego utleniania, adsorpcji na węglu aktywnym i "biologicznej filtracji". Stąd też większość współczesnych dużych ZUW powierzchniowej charakteryzuje się bardzo złożonymi strukturami technologicznymi, zakładającymi sekwencję działań następujących procesów:

**wstępne utlenianie → koagulacja → sedymentacja → filtracja pospieszna → utlenianie pośrednie → filtracja biologiczna lub adsorpcja → dezynfekcja**

Powyższe zmiany struktury systemowej technologii uzdatniania wód powierzchniowych, z uwagi na ich zakres jak i powszechność, obejmującą badania i wdrożenia, zamykają drugi okres rozwoju TUV, określając równocześnie problematykę współczesną dyscypliny.

Budowa nowych zakładów uzdatniania wody lub gruntowna modernizacja istniejących jest z zasady poprzedzona badaniami przedprojektowymi. Badania przedprojektowe, z natury aplikacyjne, dotyczące wyboru technologii uzdatniania wody, obejmują także wybór źródła wody i rodzaju ujęcia oraz metody ich ochrony, co w przypadku dużych miast jest zagadnieniem złożonym. Sprawdzona jest także zasada, iż lepiej jest ujmować wody mniej zanieczyszczone ale położone bliżej miejsca zaopatrzenia. W kompleksowych badaniach przedprojektowych dużych wodociągów koncepcję technologii uzdatniania opracowuje się na ogół dla kilku wytypowanych źródeł wody o wystarczającej wydajności. Koncepcje te w dalszej kolejności są przedmiotem weryfikacji doświadczalnej w skali pilotowej. W końcowej fazie analiza ekonomiczna opracowanych wariantów technologii uzdatniania jest podstawą podjęcia decyzji wyboru właściwego wariantu, który staje się przedmiotem projektu technicznego. Niezbędny wysiłek inwestycyjny wynikał z różnicy między rozporządzeniem Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z roku 1990 oraz roku 2002 i następnym, będącej

skutkiem przyjęcia europejskich standardów jakości wody do spożycia i wejścia Polski do UE.

Znaczący postęp w intensyfikacji uzdatniania, poprzez zwiększanie efektywności rozdziału domieszek szkodliwych i niepożądanych od wody, objął w zasadzie wszystkie procesy stosowane w praktyce wodociągowej. Jednak najbardziej spektakularny postęp udało się uzyskać w procesach chemicznego utleniania, filtracji przez filtry biologicznie aktywne oraz w procesach membranowych.

W wyniku osiągniętego postępu w praktyce naukowej i inżynierskiej pojawiają się nowe reguły i zasady technologiczne obejmujące między innymi:

- problem produktów ubocznych tworzących się w procesach chemicznego utleniania i ich właściwości toksycznych, ograniczających zakres stosowania tych procesów w praktyce do warunków fizykochemicznych, ściśle określonych składem wody oraz rodzajem i wielkością dawek stosowanych utleniaczy,
- filtry biologicznie aktywne, będące współczesną modyfikacją filtrów powolnych (w tym także z wykorzystaniem złóż węglowych) oraz ich powszechne zastosowanie (najczęściej łącznie z komorami ozonowymi) do obniżenia zawartości rozpuszczonych związków organicznych,
- zastosowanie procesów membranowych – głównie mikrofiltracji, ultrafiltracji i nanofiltracji zamiast klasycznej filtracji pospiesznej, umożliwiające całkowite usunięcie z wody drobnoustrojów, zawiesin i koloidów, a w połączeniu z innymi procesami uzdatniania także domieszek rozpuszczonych,
- wykorzystanie infiltracji w układzie z basenami nawadniającymi, jako wysokoefektywnego i bezreagentowego procesu uzdatniania wód powierzchniowych, wraz z modyfikacją ich właściwości do właściwości wód podziemnych,
- zwiększenie wydajności i efektów filtracji pospiesznej, głównie poprzez zastosowanie złóż wielowarstwowych, a także wykorzystywanie kolumn filtracyjnych do prowadzenia selektywnej wymiany jonowej, na przykład azotanów na silnie zasadowych anionitach, azotu amonowego na klinoptylolicie, heterogenicznego utleniania  $Mn^{+2}$  na braunszynie oraz innych procesów fizykochemicznych w tym katalizy heterogenicznej.

Do istotnych problemów współczesnej Technologii Uzdatniania Wody zalicza się także przeciwdziałanie wtórnemu zanieczyszczeniu wody w sieci wodociągowej, co wiąże się zarówno z efektami uzdatniania jak i funkcją przypisywaną procesowi dezynfekcji. Dezynfekcja wody stanowi końcową i niezwykle istotną barierę w uzdatnianiu wody do picia, która ma na celu niezawodną ochronę zdrowia przed mikroorganizmami patogennymi. Równocześnie dokonany w ostatnich dekadach postęp wiedzy technologicznej określa proces dezynfekcji jako złożony i trudny w realizacji, definiując jakby od nowa jego funkcję i rolę w całej technologii uzdatniania wody. Nowe spojrzenie na dezynfekcję, jako na proces będący funkcjonalnym elementem całego systemu zaopatrzenia w wodę, polega na:

- dostrzeżeniu charakterystyki funkcjonalności dezynfekcji jako elementu w całości systemu, poprzez uwzględnienie relacji tego procesu jako ogniwa pośredniego między poprzedzającym go układem uzdatniania wody oraz siecią wodociągową zdefiniowaną jako specyficzny reaktor hydrodynamiczny, fizykochemiczny, biochemiczny i mikrobiologiczny,
- rozszerzeniu definicji dezynfekcji, rozumianej zarówno jako proces niszczenia drobnoustrojów, w szczególności chorobotwórczych oraz jako proces zabezpieczania wody (konserwowania wody) przed jej wtórnym zakażeniem w sieci wodociągowej, w pewnym sensie analogicznym do zabezpieczenia żywności w procesie i jej konserwowania.

To nowe spojrzenie na dezynfekcję kształtują także aktualne tendencje w kierunkach współczesnych eksperymentów doświadczalnych, dążących do doskonalenia fizycznych i biologicznych metod uzdatniania wody, zmniejszania dawek stosowanych reagentów, w tym

głównie dezynfektantów oraz zmniejszenia powstających produktów ubocznych. W badaniach nad dezynfekcją, jako funkcjonalnym elementem całego systemu dla zaopatrzenia w wodę, zwraca się między innymi uwagę na:

- konieczność oraz metody obniżania mętności nawet do wartości 0,1 NTU, celem zniwelowania chroniącego mikroorganizmy działania drobnodispersyjnych cząstek stałych, obserwowanych we wszystkich chemicznych metodach dezynfekcji, a także podczas dezynfekcji promieniami UV,
- procesy koagulacji z filtracją pospieszną, adsorpcji na węglu aktywnym, „biologicznej filtracji”, ozonowania z „biologiczną filtracją” oraz nanofiltracji, jako na procesy obniżające BOM, AOC i BDOC ponieważ prowadzi to do usunięcia znacznej części rozpuszczonych związków organicznych, wszystkich drobnoustrojów z wirusami włącznie, zmniejszenia stężenia pozostałego użytecznego chloru do wartości nieprzekraczającej 0,2 mg  $Cl_2/L$  oraz utrzymania przy tych warunkach dobrej mikrobiologicznej jakości wody w sieciach wodociągowych o długim czasie retencji,
- niektóre materiały z jakich wykonane są rurociągi jako pośrednią przyczynę rozwoju drobnoustrojów – wyniki dłuższej eksploatacji sieci wodociągowych wykonanych z plastykowanego PCV wskazują na wydzielanie się z materiałów tych rur pewnych ilości AOC, co umożliwia rozwój w nich mikroorganizmów i powstanie błony biologicznej o znacznej odporności na dezynfekcję,
- to, iż sama hydraulika sieci wodociągowej oraz czas retencji wody nie dają podstaw odnośnie prognozowania stopnia mikrobiologicznego zagrożenia; znane są przypadki zachorowań związanych z pićm wody stale płynącej w sieci, jak również znane są przypadki sieci w których mimo stagnacji przez dłuższy okres woda okazała się mikrobiologicznie pewna,

Z kolei badania nad dezynfekcją, jako procesem niszczenia drobnoustrojów i konserwowania wody, rozumianego jako zabezpieczenie przed jej wtórnym zakażeniem w sieci wodociągowej wskazują na:

- ranking odporności mikroorganizmów na dezynfekcję rosnący według kolejności:

#### **bakterie wegetatywne – wirusy jelitowe – bakterie w formie przetrwalnikowej – cysty pierwotniaków**

w którym bakterie wskaźnikowe grupy Coli mieszczą się w grupie o najmniejszej odporności, co podważa ich funkcję organizmów wskaźnikowych w stosunku do grup mikroorganizmów bardziej odpornych na dezynfekcję. Dlatego jako weryfikację tego twierdzenia należy traktować wyniki badań wskazujących, iż woda wodociągowa spełniająca wymagania normatywne, w tym mikrobiologiczne, była przyczyną od 14 do 40% zachorowań na wirusowe zapalenie żołądka i jelit, a także fakt, iż groźne dla zdrowia, a nawet życia oocysty cryptosporidium są często izolowane z wody po procesach uzdatniania, stając się przyczyną licznych zachorowań.

- małą efektywność wielu tradycyjnie stosowanych metod dezynfekcji, m. in. w stosunku do cryptosporidium, bakterii z rodzaju legionella, rotawirusów oraz konieczność usuwania mikroorganizmów odpornych na dezynfekcję w procesach uzdatniania wody poprzedzających dezynfekcję. Skuteczne są tu wieloprocessowe układy uzdatniania złożone np. z koagulacji, sedymentacji, filtracji pospiesznej, filtracji biologicznej i dezynfekcji ozonem lub promieniami UV, a w uproszczonych technologiach uzdatniania procesy membranowe (mikrofiltracja, ultrafiltracja), jeśli uwarunkowania hydrogeologiczne są korzystne, to warto zastosować też sztuczną infiltrację,
- ozonowanie i promieniowanie UV jako najbardziej skuteczne metody dezynfekcji. Ozonowanie skuteczniej od dwutlenku chloru i chloru niszczy rotawirusy oraz skutecznie inaktywuje oocysty cryptosporidium; równie skuteczną metodą są promie-

nie UV. Coraz częściej stosuje się metody łączone jak  $O_3+H_2O_2$  (metoda Peroxone) lub  $O_3+UV$  dla uzyskania efektów bakteriologicznych i technologicznych,

- chloraminowanie jako skuteczną metodę zabezpieczenia wody w sieci wodociągowej przed jej wtórnym skażeniem, współczesne badania eksploatacyjne potwierdzają skuteczność tej wcześniej już znanej metody zabezpieczenia wody w sieci wodociągowej przed rozwojem bakterii. Chloraminy, a w szczególności monochloramina, z uwagi na stabilność, jest powszechnie stosowaną metodą zabezpieczenia wody w sieci wodociągowej np. w USA, gdzie stężenie pozostałej chloraminy w wodzie wodociągowej miast przekraczających 50 tysięcy mieszkańców wynosi do 2,5 mg/L.

### 2.2.2. Technologia oczyszczania ścieków

Po II wojnie światowej zaczęto w Polsce budować oczyszczalnie mechaniczno – biologiczne, głównie ze splukiwanymi złożami biologicznymi lub z osadem czynnym. W okresie tym wprowadzono wiele różnych rozwiązań układów z osadem czynnym, do których można zaliczyć m.in.:

- układ podstawowy – komora osadu (K. O.) zasilana czołowo oraz osadnik wtórny (O),
- układ o stopniowym obciążeniu K.O. – komora osadu zasilana ściekami wielopunktowo na swej długości oraz osadnik wtórny,
- układ z regeneracją osadu czynnego – komora regeneracji + K. O. oraz osadnik wtórny,
- układ dwustopniowego oczyszczania osadem czynnym –  $KO(I^o) + O(I^o) + KO(II^o) + O(II^o)$ ,
- układ z komorą pełnego wymieszania –  $KO+O$ ,
- układ z komorą o okresowym odprowadzeniu oczyszczonych ścieków składający się tylko z K. O. (SBR).

Jednak w okresie tym w sekwencji czasowej budowa oczyszczalni ścieków pozostawała wyraźnie w tyle w stosunku do budowy zakładów uzdatniania wody. Stąd też okres ten charakteryzował się znacznym wzrostem zanieczyszczenia wód naturalnych, w szczególności powierzchniowych, na skutek odprowadzania do nich niedostatecznie oczyszczonych ścieków przemysłowych i miejskich oraz w wyniku nieodpowiednio zlokalizowanych i eksploatowanych składowisk, awarii przemysłowych i chemizacji rolnictwa. Należy podkreślić, iż powojenny okres rozwoju gospodarczego kraju w latach 1945 – 1980 według modelu wykładniczego wyraźnie preferował kryteria ilościowe nad jakościowymi, również w zarządzaniu systemami zaopatrzenia w wodę oraz usuwania i unieszkodliwiania ścieków. Stąd duża wodochłonność przemysłu, niskie ceny wody, pogorszenie się jakości wody w sieci wodociągowej, wysokie zużycie w miastach, częste awarie sieci wodociągowych i wysokie straty wody. Radykalne zmiany w zarządzaniu tymi systemami następują dopiero w latach 1990 – 2010, co jest związane z dostosowywaniem przepisów i rozporządzeń krajowych do standardów europejskich, w kontekście przystępowania Polski do UE. W pierwszej kolejności należy tu wyszczególnić Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa opublikowane w listopadzie 1991 roku, w sprawie klasyfikacji wód oraz warunków jakim powinny odpowiadać ścieki wprowadzane do wód lub do ziemi. Od tego czasu wymagane jest usuwanie ze ścieków miejskich związków węgla oraz związków biogenych – azotu i fosforu. Dostosowane do dyrektywy Unii Europejskiej nowe, obowiązujące od początku 2003 r. przepisy, stały się bardziej liberalne dla małych oczyszczalni, natomiast dla dużych stały się podstawą doskonalenia stosowanych obecnie technologii, zwłaszcza w odniesieniu do efektywności usuwania azotu. W praktyce spowodowało to w Polsce rozwój i budowę oczyszczalni ścieków z osadem czynnym, bazujących na zintegrowanym biologicznym (z ewentualnym wspomaganie chemicznym) usuwaniu związków organicznych i biogenych. Stosowane układy składają się z komór beztlenowych (SB), anoksycznych (SA) i tlenowych (ST), w różnych konfiguracjach i wzajemnych proporcjach. Układy te można podzielić na przeznaczone do:

- usuwania związków organicznych i azotu,
- usuwania związków organicznych i fosforu,
- łącznego usuwania związków organicznych, azotu i fosforu.

Badania naukowe w dyscyplinie technologii oczyszczania ścieków prowadzone są obecnie w trzech podstawowych kierunkach.

Pierwszy kierunek obejmuje zagadnienia związane z wyjaśnieniem mechanizmów i poznaniem kinetyki oraz stechiometrii jednostkowych procesów oczyszczania ścieków, identyfikację zanieczyszczeń wpływających na te procesy oraz badania technologiczne istniejących układów oczyszczania i badania nowych technologii. W badaniach tych duży nacisk kładzie się na charakterystykę ścieków jako podstawę do opisu wszelkich procesów jednostkowych usuwania lub przekształcania rozmaitych frakcji zanieczyszczeń. Doskonali się techniki pomiarowe, zarówno wskaźników zanieczyszczeń jak i frakcji zanieczyszczeń, pozwalających wnikać w kinetykę poszczególnych procesów. Badania stosowanych obecnie technologii zintegrowanego usuwania ze ścieków związków węgla, azotu i fosforu zmierzają w kierunku poprawy efektywności poszczególnych procesów. Przykładem mogą być badania prowadzone nad generowaniem lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) dla poprawy biologicznego usuwania fosforu oraz dezynfekcji. Wiele prac badawczych podejmuje temat identyfikacji gatunkowej i enzymatycznej biomasy. Mechanizmy poszczególnych procesów wyjaśnione są na poziomie metabolizmu komórkowego, co wydatnie zwiększa wiedzę na temat optymalnych warunków ich prowadzenia. Zwiększenie wydajności procesu osadu czynnego, poprzez stosowanie złoża ruchomego w masie osadu czynnego (reaktory MBBR), to kolejne obszary zainteresowań badaczy. Dużym wyzwaniem dla naukowców oraz inżynierów praktyków jest od lat problem puchnięcia osadu. Wiele osiągnięto w tej kwestii, jednak zarówno puchnięcie osadu, wynoszenie go na powierzchnię i pienienie wciąż jest praktycznym problemem wielu oczyszczalni.

Drugi kierunek badań obejmuje dynamicznie rozwijające się modelowanie matematyczne procesów i układów technologicznych oczyszczania ścieków, pod kątem praktycznego zastosowania w specjalistycznych programach komputerowych. Stosowane obecnie i rozwijane modele, posługują się zapisem macierzowym i z reguły mają otwartą strukturę, pozwalając na rozbudowanie modelu o kolejne interesujące procesy. Standardem w tej dziedzinie stały się opracowane przez międzynarodową grupę roboczą, powołaną przez IWA modele matematyczne osadu czynnego ASM1, ASM2 i ASM3 wraz z ich modyfikacjami. Modelowanie matematyczne procesów oczyszczania ścieków jest obecnie intensywnie rozwijane w wielu kierunkach. Poza wymienionymi wcześniej modelami osadu czynnego, opracowano modele złożów biologicznych, procesów beztlenowych, modele przemian zanieczyszczenia zachodzących podczas transportu ścieków siecią kanalizacyjną oraz modele środowiska rzeczno. Umożliwiło to kompleksowe symulowanie procesów przemiany zanieczyszczeń w ściekach, zachodzących od powstawania ścieków poprzez ich oczyszczanie w oczyszczalni ścieków do zmian jakie wywołuje odprowadzenie ścieków oczyszczonych i nieoczyszczonych do odbiorników. Oprócz intensywnie rozwijanych modeli, opartych na równaniach bilansowych, kinetyce i stechiometrii poszczególnych procesów, podejmowane są też z powodzeniem próby opracowania modeli opartych na sieciach neuronowych. Wraz z opracowaniem modeli matematycznych opracowano szereg programów symulacyjnych, wykorzystujących te modele. Dobry program symulacyjny jest współczesnym efektywnym narzędziem, wspomagającym projektowanie oczyszczalni ścieków oraz ich prawidłową eksploatację.

Trzeci kierunek badawczy obejmuje zagadnienia związane z optymalizacją stosowanych układów i procesów. Optymalizacja ta prowadzona jest zarówno pod kątem zmniejszenia wymaganych kubatur obiektów jak i zmniejszenia kosztów eksploatacji. W pracach tych wykorzystuje się dodatkowo wiedzę z takich dziedzin nauki jak hydraulika, termodynamika, sterowanie i optymalizacja. Optymalizacja pracy oczyszczalni prowadzona jest w różnych aspektach. Szereg prac



naukowo-badawczych zajmuje się optymalizacją przepływu pod kątem hydraulicznym. Równomierny rozdział ścieków na poszczególne urządzenia rzutuje na równomierne obciążenie obiektów, zwłaszcza osadników i reaktorów biologicznych i tym samym przekłada się na uzyskiwane efekty. Optymalizacja procesu technologicznego prowadzona jest pod kątem osiągnięcia jak najlepszych efektów oczyszczania lub minimalizacji kosztów eksploatacyjnych, przy zachowaniu wymaganych wskaźników jakości ścieków oczyszczonych. Duży nacisk kładzie się też w badaniach na minimalizację zużycia energii oraz wykorzystanie procesów pozwalających na jej odzysk.

Technologia oczyszczania ścieków, jako nauka typowo empiryczna, całą dotychczasową wiedzę rozwinęła w oparciu o powtarzające się autonomicznie cykle eksperymentów doświadczalnych, prowadzących do budowania teorii implikujących następne problemy, wymagające następnym eksperymentów. Tę metodykę rozwoju wiedzy opartą na powtarzającym się schemacie:

#### eksperyment doświadczalny – teoria,

obecnie zastępuje się nowym paradygmatem technologii oczyszczania ścieków określonym triadą zintegrowanych elementów, to jest:

#### eksperyment doświadczalny – teoria – eksperyment symulacyjny.

Zastosowanie eksperymentu symulacyjnego, jak i jego efektywność, jest wynikiem możliwości coraz dokładniejszych modeli technologii osadu czynnego, jak i metod obliczeniowych współczesnych komputerów. Należy podkreślić, iż badania technologii osadu czynnego oparte na współczesnym eksperymencie, modelowaniu i symulacji klasyfikują się obecnie do podstawowych metod podejmowania optymalnych decyzji w projektowaniu i eksploatacji oczyszczalni ścieków, prowadzących w efekcie do obniżenia kosztów i czasu trwania tych badań.

### 3. Czasy współczesne – prognozy rozwoju

W ostatnich trzech dekadach (1990-2020) zmiany zachodzące w technologii wody i ścieków zostały w dużym stopniu zdeterminowane przez 3 zintegrowane grupy czynników określone przez:

- zmiany i przekształcenia ustrojowe, społeczno-gospodarcze i administracyjne jakie nastąpiły w Polsce i w Europie środkowo-wschodniej po roku 1989,
- zmiany cywilizacyjne i gospodarcze w skali globalnej, zdefiniowane zasadą zrównoważonego rozwoju, charakteryzujące się

przejściem do modelu gospodarki zrównoważonej ekologicznie, obejmującej zastępowanie paliw kopalnych alternatywnymi źródłami energii odnawialnej,

- zmiany i restrukturyzującą systemu administracyjno-gospodarczego kraju, wynikające z przystąpienia Polski do UE, w tym m. in. dostosowanie krajowych podmiotów naukowych do funkcjonowania w europejskim systemie badawczo-rozwojowym.

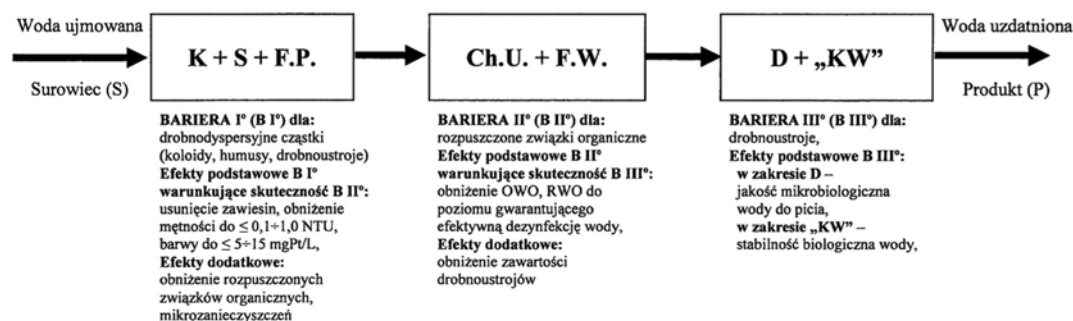
Zmiany te, ich kompleksowość i zakres, będące precedensem w dotychczasowej historii naszego kraju, spowodowały m. in.:

- gruntowną modernizację systemów zaopatrzenia w wodę oraz usuwania i unieszkodliwiania ścieków we wszystkich miastach i osiedlach,
- wyraźny wzrost wymagań stawianych wodzie do spożycia i oczyszczonym ściekom,
- wyraźny spadek jednostkowego zapotrzebowania wody z około (250±50) L/Mk-d do około (100±20) L/Mk-d i związany z tym wzrost opłat za wodę i ścieki,
- dążenie do rozwiązań optymalnych dla zakładów uzdatniania wody i oczyszczalni ścieków z minimalizacją zapotrzebowania na energię, reagenty, tworzących się produktów ubocznych i osadów, co w praktyce oznacza preferencje procesów fizycznych i biologicznych.

Technologie projektowanych współcześnie zakładów uzdatniania wody, oparte są na właściwościach wielostopniowych barier (rys. 8) zakładających niezawodne działanie tych zakładów, nawet w warunkach wystąpienia nagłego zanieczyszczenia źródła wody, zarówno biologicznego jak i chemicznego. Geneza takiej koncepcji tkwi w tradycji historycznej oraz we współczesnych doświadczeniach TUW jako dyscypliny, której rozwój dokonywał się niejednokrotnie jako skutek katastrofalnego zanieczyszczenia źródeł wody.

Zasada wielostopniowych barier określa sekwencje i funkcje poszczególnych barier w systemie oraz formułuje ich zadania i efekty. Funkcje poszczególnych barier wynikają z przyczynowo-skutkowych wzajemnych uwarunkowań w osiągnięciu efektów uzdatniania (rys. 8). Przykładowo efekty bariery 2 dla rozpuszczonych związków organicznych są uwarunkowane skutecznością bariery 1, usuwającej zawiesinę, obniżającej mętność, barwę, a z kolei efekty bariery 3 – dezynfekcji są niemożliwe do osiągnięcia bez skutecznego działania bariery 2. Szczególnie korzystną technologię, spełniającą zasadę wielostopniowych barier, uzyskuje się wprowadzając proces infiltracji jako bariere 1 (rys. 9). W technologii tej, spełniającej zasadę zrównoważonego

#### PRZYKŁAD WIELOSTOPNIOWEJ BARIERY UZDATNIANIA WODY



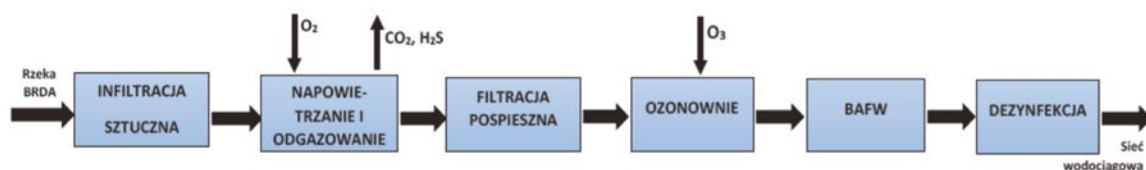
#### ROZWIĄZYWANE PROBLEMY

Ilość i jakość wody ujmowanej	Technologia ZUW – wielostopniowy system uzdatniania				Efekty uzdatniania, monitoring jakości wody uzdatnionej.
	B I <sup>o</sup>	K,S,F.P. – metody, parametry procesowe, urządzenia, efekty.	B II <sup>o</sup>	Ch.U., F.W. – metody, parametry procesowe, urządzenia, efekty.	

K – koagulacja, S – sedymentacja, F.P. – filtracja pospieszna,  
Ch.U. – chemiczne utlenianie, F.W. – filtry węglowe,  
D – dezynfekcja, „KW” – konserwowanie wody.

Rys. 8. Koncepcja wielostopniowych barier w technologii uzdatniania wody z zastosowaniem procesów konwencjonalnych

Fig. 8. The concept of multistage barriers in water treatment technology using conventional processes



Sekwencja barier, efekty uzdatniania w barierach

BARIERA I :	BARIERA II :	BARIERA III :	BARIERA IV :	BARIERA V :	BARIERA VI :
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Usuwanie:</b> Plankton, patogeny (bakterie, wirusy) cząstki stałe, biodegradowalne związki organiczne (spadek OWO);</li> <li>• <b>Stabilizacja:</b> Temperatura, skład chemiczny;</li> <li>• <b>Potencjalne możliwości:</b> Usuwanie wielu mikrozanieczyszczeń, ochrona przed awaryjnym zanieczyszczeniem Brdy.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• natlenienie wody (O<sub>2</sub>);</li> <li>• odkwaszenie (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S...);</li> <li>• potencjalne możliwości desorpcji lotnych związków organicznych.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odżelazianie, odmanganianie wody;</li> <li>• Nitryfikacja wody.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemiczne utlenienie;</li> <li>• Dezynfekcja;</li> <li>• Transformacja niebiodegradowalnych związków organicznych w biodegradowalne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradacja związków organicznych (spadek OWO);</li> <li>• Biologiczna stabilizacja wody.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dezynfekcja końcowa;</li> <li>• Konserwowanie wody w sieci wodociągowej</li> </ul>

Rys. 9. Koncepcja wielostopniowych barier w technologii uzdatniania wody z zastosowaniem infiltracji

Fig. 9. The concept of multistage barriers in water treatment technology with the use of infiltration

rozwoju, uzyskuje się modyfikację właściwości wód powierzchniowych do wód podziemnych, a także dalszy wzrost efektów usuwania wielu mikrozanieczyszczeń oraz patogennych drobnoustrojów. Zastosowanie infiltracji oprócz wyżej wymienionych zalet umożliwia także uzyskanie:

- znacznej stabilności składu i temperatury uzdatnianej wody,
- wysokich efektów obniżenia zawartości rozpuszczonych związków organicznych,
- niezawodnego zapotrzebowania w wodę w okresie konieczności zaprzestania poboru wody powierzchniowej, na przykład z rzeki w okresie jej katastrofalnego zanieczyszczenia.

W metodologii projektowania technologii ZUW, według zasady wielostopniowych barier, wiodącą funkcję i znaczenie przypisuje się procesom dezynfekcji – bariera 3 lub 4, przypisując jej dwa dodatkowe następujące zadania:

- jako procesu diagnozującego efektywność technologiczną procesów barier poprzedzających dezynfekcję, przygotowujących uzdatnianą wodę do dezynfekcji,
- jako procesu konserwującego wodę, zabezpieczając ją tym samym przed jej wtórnym zakażeniem w sieci wodociągowej.

To nowe, bardziej kompleksowe spojrzenie na dezynfekcję, kształtuje także aktualne tendencje i kierunki eksperymentów badawczych, obejmujących zarówno procesy uzdatniania jak i biologiczną stabilność wody (BSW). Należy podkreślić, iż konserwowanie wody jest w pewnym sensie substytutem BSW, którą w większości eksploatowanych sieci wodociągowych trudno jest uzyskać, bez pozostawienia w niej aktywnego dezynfektanta. Są to w większości rozwiązań dwutlenek chloru i chlor. Zastosowanie metody „dezynfektanta pozostałego” w wodzie znajdującej się w sieci wodociągowej jest zatem działaniem alternatywnym, zastępującym w sensie użytkowym jej naturalną biologiczną stabilność. Problematyka BSW dotyczy wody wodociągowej, pochodzącej zarówno z ujęć wód powierzchniowych, jak i podziemnych.

Podstawową zasadą metodyczną współczesnej technologii uzdatniania wody jest reguła zarządzania ryzykiem, spowodowanym spożyciem wody. Reguła ta zakłada po pierwsze wyższy poziom zagrożenia mikrobiologicznego w stosunku do poziomu zagrożenia substancjami toksycznymi – mikrozanieczyszczeniami oraz „po drugi, określa akceptowany poziom ryzyka zdrowotnego w warunkach narażenia na substancje toksyczne, wyrażony prawdopodobieństwem  $P = 10^{-5}$  wystąpienia dodatkowego przypadku śmiertelnego w populacji 100 tys. ludzi w całym okresie życia człowieka (przyjęto 70 lat). Akceptowalne ryzyko jest decyzją arbitralną, podjętą przez przedstawicieli społeczeństwa, relatywną do jego poziomu cywilizacyjnego. Reguła ta stanowi

podstawę opracowanych zaleceń, rozporządzeń i dyrektyw, określających jakość wody do spożycia. Spełnienie wymagań jakości wody do spożycia umożliwiają zasady bezpieczeństwa systemów uzdatniania wody, wywodzące się z teorii niezawodności, rozumiane jako zbiór zasad i metod określających potencjalną odporność systemów na czynniki i zakłócenia, mogące prowadzić do ich niesprawności, zawodności. Stabilną i wysoką efektywność uzdatniania wody osiąga się w wyniku prawidłowej realizacji pełnego cyklu inwestycyjnego ZUW, obejmującego badania, projektowanie, wykonawstwo i eksploatację. Do podstawowych warunków osiągnięcia stabilnej i wysokiej efektywności uzdatniania zaliczamy:

- wybór właściwego źródła wody i sposobu jej ujmowania, na przykład ujęcia infiltracyjne dla wód rzecznych,
- ochronę sanitarną ujęcia,
- niezawodny monitoring,
- wybór optymalnej technologii uzdatniania opartej na badaniach i projektowaniu uwzględniającym najnowszy stan wiedzy
- staranną eksploatację ZUW uwzględniającą natychmiastowe reakcje na sygnały ostrzegawcze monitoringu.

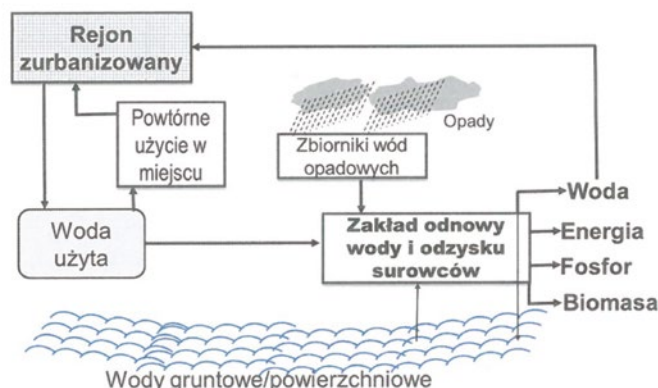
Przewaga procesów biologicznych i fizycznych nad chemicznymi z perspektywy celów i zadań technologii oczyszczania ścieków jest jeszcze bardziej widoczna niż w technologii uzdatniania wody. Dążenie do minimalizacji kosztów, w tym zapotrzebowania energii i reagentów wyeliminowało fizyczno-chemiczne technologie usuwania azotu i fosforu ze ścieków, które mimo wysokiej jakości oczyszczonych ścieków nie znalazły powszechnego zastosowania. Niewątpliwie dużym osiągnięciem poznawczym i aplikacyjnym na drodze do samowystarczalności energetycznej było odkrycie bakterii Anammox, które w połączeniu z bakteriami utleniającymi amoniak do azotynów przekształcają azot amonowy do azotu gazowego. Korzyści aplikacyjne wynikające z zastosowania procesu Anammox to znaczące zmniejszenie zapotrzebowania energii na napowietrzanie ścieków, brak konieczności dawkowania zewnętrznego źródła węgla, zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> i tlenków azotu, a także mniejsza produkcja osadu nadmiernego. Proces Anammox jest powszechnie stosowany w oczyszczaniu wód osadowych i odcieków o podwyższonej zawartości amoniaku i temperaturach od 30 do 35°C. Wadą tego procesu jest długi czas wpracowywania się układu (wolny przyrost bakterii), stąd też zastosowanie tego procesu do oczyszczania ścieków w ciągu głównym, które charakteryzuje niższa temperatura jest już technologicznie trudniejsze. Kolejnym osiągnięciem prowadzącym do zmniejszenia kosztów energii biologicznego oczyszczania ścieków jest technologia tlenowego osadu granulowanego, umożliwiająca usuwanie azotu

i fosforu w warunkach tlenowych dzięki warstwowemu układowi grup bakterii wewnątrz granulki osadu zgodnie ze zmianami potencjału redoks. Zalety tej metody wynikają z korzystnych właściwości granul osadu, w tym wysoka koncentracja biomasy, szybka sedimentacja, brak skłonności do pęcznienia. Zastosowanie tej metody prowadzi także do zmniejszenia objętości reaktorów biologicznych.

Interesujące – nowatorskie kierunki dalszych badań nad rozwojem technologii oczyszczania ścieków w XXI wieku określają koncepcje i eksperymenty prowadzone nad:

- zastosowaniem pola elektromagnetycznego do wzrostu aktywności osadu czynnego i relatywnego wzrostu usuwania związków biogenych z możliwością wykluczenia zewnętrznego źródła węgla [Krzemieniewski i in., 2001],
- technologia jednostopniowego bezpośredniego oczyszczania ścieków z zastosowaniem nie porowatych membran dyfuzyjnych z błoną biologiczną i jednoczesnych autotroficznych procesów utleniania i redukcji azotu oraz usuwania fosforu poprzez absorpcję i elektrokinetyczne procesy bezpośredniego strącania fosforu ze ścieków do postaci nawozu amonowo-fosforowego [Hwang i in., 2010],
- mikrobiologicznymi ogniwami paliwowymi umożliwiającymi odzysk energii w postaci na przykład wodoru lub prądu elektrycznego bezpośrednio ze ścieków bez konieczności zagęszczania węgla do postaci osadów [Ullery, Logan 2015].

W prognozach optymalnego rozwoju współczesnej gospodarki wodno-ściekowej w miastach zakłada się koncepcję zintegrowanego systemu obejmującego oczyszczalnię ścieków, zakłady odnowy wody i uzdatniania wody pracujące w obiegu zamkniętym. W rozwiązaniach tych wody opadowe, wody zużyte będą surowcami do odnowy i recykulacji wody, a oczyszczalnie ścieków będą zakładami odzysku wody, energii, fosforu i biomasy (rys. 10).



Rys.10. Ogólna koncepcja obiegu zamkniętego gospodarki wodno-ściekowej [Oleszkiewicz, 2014]

Fig. 10. The general concept of a closed-loop water and wastewater management [Oleszkiewicz, 2014]

Rozwiązania te, szczególnie polecane w regionach z niedoborami wody, są kierunkiem rozwoju współczesnej cywilizacji poszukującej nowej – ekologicznej wizji miasta.

#### 4. KONKLUZJE KOŃCOWE

Poziom współczesnej inżynierii, technologii i ekonomii pozwala projektować, budować i eksploatować niezawodne systemy zaopatrzenia w wodę oraz systemy usuwania i unieszkodliwiania ścieków z uwzględnieniem ich wielkości oraz lokalnych uwarunkowań środowiskowych, cywilizacyjnych i kulturowych. Systemy te w największych i najbardziej rozwiniętych aglomeracjach miejsko-przemysłowych świata klasyfikują się do największych osiągnięć współczesnej nauki, techniki i ekonomii, tak pod względem wielkości obiektów i urządzeń, kosztów inwestycji, jak również precyzji i stopnia automatyzacji,

sterowania oraz monitorowania, a także wielowymiarowości wykorzystanych w tych systemach procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Równocześnie systemy te są systemami otwartymi i dynamicznymi, a ich otoczenie to środowisko naturalne, gospodarka i społeczeństwo. Podstawowe zbiory wejść do tych systemów to objętość i jakość ujmowanej wody, doprowadzone materiały, reagenty i energia oraz niezbędne informacje, natomiast wyjścia to objętość i jakość uzdatnionej wody dostarczonej użytkownikom oraz ilość i jakość oczyszczonych ścieków, odprowadzanych do środowiska lub pozostających w obiegu zamkniętym. Powyższe informacje wskazują, iż zasadniczymi ograniczeniami wielkości i niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę, w tym jakości wody uzdatnionej, są wielkość zasobów wody dyspozycyjnej, jej jakość oraz koszty inwestycyjne, a w szczególności eksploatacyjne, pozostające w bezpośredniej relacji do ceny wody. Ograniczona wielkość zasobów wody oraz koszty jej ujmowania, uzdatniania i dystrybucji, będą miały decydujące znaczenie dla rozwoju większości miast w XXI w., które w bilansie swego zapotrzebowania wody powinny uwzględnić źródła alternatywne, w tym wody opadowe, odzyskiwanie wody ze ścieków (odnowę wody) i odsalanie wody morskiej.

Prognozy rozwoju współczesnych technologii uzdatniania wody i technologii oczyszczania ścieków opiera się na ich trzech ważnych cechach:

- autonomiczności i samokorygowaniu,
- wydzieleniu zasobu wiedzy aplikacyjnej, niezbędnego dla osiągnięcia celów społeczno-gospodarczych,
- byciu jednym z podstawowych czynników tworzących współczesną kulturę i cywilizację.

W odniesieniu do pierwszej z cech, TUV i TOŚ, jako autonomiczne dyscypliny nauki, charakteryzuje idea łączenia badań i nauczania, czyli tworzenie tzw. szkół wokół określonego zbioru twórczych poglądów i hipotez, zakładających kształcenie kadry naukowej poprzez realizację prac badawczo-rozwojowych (B+R).

Druga z wymienionych cech TUV i TOŚ wskazuje jako podstawę osiągnięcia celów społeczno-gospodarczych bardzo szerokie spektrum działań, dotyczących tworzenia infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej. Działania te obejmują prace badawczo-wdrożeniowe, projektowo-konstrukcyjne, transfer technologii i kapitału, marketing, inwestycje i eksploatację.

Trzecia cecha dyscypliny decyduje w efekcie o poziomie sanitarnym i higienie miast i gmin, zdrowiu publicznym i walorach estetycznych oraz o atrakcyjności i rozwoju miast i regionów.

Rola cywilizacyjna TUV i TOŚ zależy zatem od wagi rozwiązywanych przez nią problemów egzystencjalnych człowieka oraz rozwoju przemysłu i rolnictwa, natomiast niezawodność urządzeń i obiektów zakładów uzdatniania wody i oczyszczania ścieków uznaje się za jedno z podstawowych kryteriów poziomu gospodarki danego kraju i standardu życia jego społeczeństwa. ■

#### LITERATURA

- [1] Bodzek M., Konieczny K. (2005), Wykorzystanie procesów membranowych w uzdatnianiu wody, Wyd. Projprzem-EKO.
- [2] Bodzek M., Konieczny K., Rajca M. (2019), Membranes in water and wastewater disinfection – review, Archives of Environmental Protection 45, 1, pp. 3–18, DOI: 10.1515/aep-2015-0016
- [3] Cook G.D. Carlson R.E. (1989), Reservoir Management for Water Quality and THM Precursor Control, AWWA Research Foundation Report, AWWA Denver, CO, USA.
- [4] Domańska M., Łomotowski J. (2009), Badania nad szybkością zaniku chloru i dwutlenku chloru w wodzie w sieci wodociągowej. Ochrona Środowiska 2009, vol. 31, nr 4, ss. 47–49
- [5] Dymaczewski Z. (2015), Kanalizacja grawitacyjna jako system transportu oraz przemian biochemicznych ścieków, Wyd. Politechniki Poznańskiej, seria Monografie, nr 524.
- [6] Dymaczewski Z. (red.), (2011), Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. Wyd. 3, PZITS, Poznań.

- [7] Dymaczewski Z., Jez-Walkowiak J., Michalkiewicz M., Makala A., Sozański M.M. (2020), Redefining the purpose, goals and methods of disinfection in contemporary water supply systems, *Archives of Environmental Protection* – 2020, vol. 46, no. 1, s. 85-92
- [8] Flynn K.C., Williams T. (1994), *Watershed Management*, EE&T.
- [9] Gumińska J., Klos M., Pawłowska A. (2010), Disinfection by-products precursors removal from dam reservoir water, *Archives of Environmental Protection*, 36, 3, pp. 39–50.
- [10] Holden G.W. (2017), Chlorine Dioxide Preoxidation for DBP Reduction. *Journal – American Water Works Association* 2017, vol. 109, No. 7, pp. 36–43.
- [11] Huck P.M., Coffey B.M., Emelko M.B., Maurizio D.D., Slawson r.M., Anderson W.B., Van Den Oever J., Douglas A.P., Omelia C.R. (2002) Effects of Filter Operation on Cryptosporidium Removal Microbial Pathogens. *Journal – American Water Works Association* 2002, vol. 94, No. 6, pp. 97–111.
- [12] Hwang J.H., Cicek N., Oleszkiewicz J. (2010), Achieving biofilm control in a membrane biofilm reactor removing total nitrogen, *Water Research* 44: 2283-2291.
- [13] Kawamura S. (2000), *Integrated design and operation of water treatment facilities* John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [14] Konieczny K. (2000), Ultrafiltracja i mikrofiltracja w uzdatnianiu wód dla celów komunalnych. *Inżynieria Środowiska* Nr 42, Politechnika Śląska.
- [15] Krzemieniowski M. i in., (2001), Wpływ pola elektromagnetycznego na proces usuwania fosforu ze ścieków, *Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Sanitarnej*, Nr 20, Seria Inżynierii Środowiska, ss 375-384.
- [16] Kwietniewski M. (2017), GIS w wodociągach i kanalizacji, *Profinfo.pl*
- [17] Kwietniewski M., Rak J. (2010), Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce, *Polska Akademia Nauk, Warszawa*.
- [18] Montgomery J.M. (1985), *Consulting Engineers, Water Treatment: Principles and Design*, Wiley, New York.
- [19] MWH (2012), *Water Treatment Principles and Design*, John Wiley&Sons, Inc., Hoboken USA.
- [20] Olańczuk-Neyman K., Quant B. (2015), *Dezynfekcja ścieków*, Wyd. Seidel-Przywecki.
- [21] Oleszkiewicz J. (2014), *Wykład z okazji nadania tytułu doktora h.c.*, Wyd. Politechniki Poznańskiej.
- [22] Olsińska U. (2017), Charakterystyka metod zapobiegania powstawaniu brominów(V) w wodzie przeznaczony do spożycia. *Ochrona Środowiska* 2017, vol. 39, nr 2, ss. 17–26.
- [23] Samson C.C., Seidel C.J., Summers r.S., Bartrand T. (2017), Assessment of HAA9 Occurrence and THM, HAA Speciation in the United States. *Journal of American Water Works Association* 2017, vol. 109, No. 7, pp. E288–E301.
- [24] Siembida L., Lösch B., Anderson W.B., Bonsteel J., Huck P.M. (2014) Pretreatment impacts on biopolymers in adjacent ultrafiltration plants *Journal – American Water Works Association* 2014, vol. 106, No. 9, pp. E372–E382.
- [25] Sokółowska A., Jankowska K., Kulbat E., Olańczuk-Neyman K. (2015), Badania stabilności biologicznej wody w wybranych systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2015, vol. 37, nr 4, ss. 31–37.
- [26] Sozański M.M. (red.), (2002), *Wodociągi i Kanalizacja w Polsce, tradycja i współczesność*, Wyd. Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Poznań-Bydgoszcz 2002.
- [27] Sozański M.M., Huck P.M. (2007), *Badania doświadczalne w rozwoju technologii uzdatniania wody*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr 42, Wyd. LIBER DUO, Lublin.
- [28] Sozański M.M., Olańczuk-Neyman K. (2002) Stan wiedzy i perspektywy rozwoju technologii uzdatniania wody jako współczesnej dyscypliny nauki, *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska P.A.N.*, Vol. 9 – *Inżynieria Środowiska Stan Obecny i Perspektywy Rozwoju*, Lublin.
- [29] Ullery M.L., Logan B.E. (2015), Anode acclimation method and their impact on microbial electrolysis cell treating fermentation effluent, *J. Hydrogen Energy* 40(21): 6782-6791.
- [30] *Water Treatment Plant Design* (1990), American Water Works Association, McGraw-Hill Publishing Company, New York.
- [31] WHO (2000), *Disinfectants and disinfectant by-products*, World Health Organization, Geneva, International Programme on Chemical Safety, 499 pp.
- [32] Włodyka-Bergier A. (2016), UV254 radiation impact on organic halogen disinfection by-products formation in swimming pool water, *Rozprawy, Monografie* Nr 309, Wyd. AGH, Kraków, Polska
- [33] Włodyka-Bergier A., Bergier T. (2015), Badania wpływu promieniowania nadfioletowego na stabilność mikrobiologiczną wody. *Ochrona Środowiska* 2015, vol. 37, nr 4, ss. 47–50.