

Krzysztof Bartoszewski

Technologie oczyszczania ścieków i przeróbki osadów stosowane w warunkach krajowych

Stosowane i wdrażane obecnie w świecie technologie oczyszczania ścieków są funkcją stanu gospodarczego danego kraju oraz obowiązujących w nim przepisów prawnych. W Polsce prawdziwą rewolucję we wdrażanych technologiach oczyszczania ścieków spowodowało rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z 5 listopada 1991 r. w sprawie klasyfikacji wód oraz warunków, jakim powinny odpowiadać ścieki odprowadzane do wód lub do ziemi (Dz.U. nr 116, poz. 503). Rozporządzenie to dzieli oczyszczalnie ścieków na trzy podstawowe grupy:

- o przepustowości do $5 \text{ m}^3/\text{d}$ (tzw. oczyszczalnie domowe),
- o przepustowości do $2.000 \text{ m}^3/\text{d}$,
- o przepustowości powyżej $2.000 \text{ m}^3/\text{d}$.

We wszystkich oczyszczalniach ścieków wymagana jest pełna nityfikacja ścieków z równoczesnym ograniczeniem zawartości związków azotu i fosforu w odpływie, z wyjątkiem niektórych oczyszczalni domowych ($Q < 5 \text{ m}^3/\text{d}$). Rozporządzenie to, korzystne dla ochrony wód przed zanieczyszczeniem, jest jednak mało korzystne dla inwestorów, ponieważ utrzymanie wymaganej jakości ścieków oczyszczonych wymaga budowy kosztownych inwestycyjnie i eksploatacyjnie oczyszczalni. Rozporządzenie to jest mocno krytykowane w kraju, głównie z uwagi na brak zaostrożenia wymagań jakości ścieków oczyszczonych wraz ze wzrostem ilości ścieków oczyszczanych. Natomiast przeróbka osadów na oczyszczalniach nie jest zależna od tego rozporządzenia i przy jej rozwiązaniu kierować się należy zasadą racjonalności i minimalizacji kosztów, tzw. ekonomią układów osadowych.

Zupełnie inne warunki należy spełnić, jeżeli przewiduje się rolnicze wykorzystanie ścieków (M.P. nr 23/86, poz. 170). Ścieki przeznaczone do rolniczego wykorzystania (np. ścieki surowe) muszą spełniać tylko odpowiednie warunki sanitarne, a osoba (zakład) prowadząca rolnicze wykorzystanie ścieków zobowiązana jest do corocznego oznaczania zawartości metali ciężkich w nawadnianych glebach. Jeżeli ich ilość przekroczy dopuszczalne normy, wówczas zabronione jest dalsze rolnicze wykorzystanie tego terenu do nawadniania ściekami. Rolnicze wykorzystanie ścieków jest obwarowane wieloma ograniczeniami, a także wymaga dezynfekcji ścieków. Stąd też ta metoda oczyszczania ścieków nie może być często stosowana w Polsce.

Małe oczyszczalnie ścieków

Przez małe ilości ścieków należy rozumieć ilość ścieków zawartą w przedziale od $0,5$ do $500 \text{ m}^3/\text{d}$. W literaturze światowej oczyszczanie ścieków z pojedynczych domów lub niewielkiej grupy do-

mów określane jest mianem *onsite wastewater treatment*, natomiast ze wsi lub miasteczek – *small wastewater treatment plant*. W literaturze polskiej oczyszczalnie te określa się odpowiednio mianem domowych (lokalnych) lub wiejskich (gminnych) oczyszczalni ścieków. W Polsce wiele domów nie jest podłączonych do sieci kanalizacyjnej oraz nie ma racjonalnie rozwiązanych sposobów oczyszczania ścieków. Najprostsze to tzw. suche ustępy lub zbiorniki bezodpływowe oraz bardzo popularne w niektórych regionach kraju osadniki gnilne. Rozwiązania te nie spełniają obecnie wymagań prawnych dotyczących jakości ścieków oczyszczonych. W Polsce ścieki z domowych oczyszczalni można wprowadzać do ziemi lub do cieków stanowiących urządzenia melioracji wodnych szcze-gółowych pod warunkiem, że ścieki te:

- nie zawierają zanieczyszczeń z grupy D i E,
- pozostałe wskaźniki nie przekraczają wartości grup A, B i C,
- zwierciadło wód podziemnych znajduje się co najmniej $1,5 \text{ m}$ poniżej poziomu wprowadzania ścieków,
- nie zagrażają jakości wód podziemnych.

W przypadku odprowadzania małych ilości ścieków do dopływu do jeziora (bezpośrednio do jeziora nie wolno odprowadzać ścieków) wymagany jest dodatkowo wysoki stopień defosfatacji ścieków (zawartość fosforu $\leq 1,0 \text{ gP/m}^3$).

Małe oczyszczalnie ścieków powinny cechować się prostotą i niezawodnością w eksploatacji. Oczyszczalnie te nie mają z reguły stałej obsługi, co wymaga aby pracowały efektywnie bez ingerencji użytkownika. Do oczyszczania małych ilości ścieków stosuje się trzy podstawowe grupy metod:

- metody wykorzystujące procesy naturalne, w tym głównie oczyszczanie w gruncie (nie należy mylić z gruntem jako odbornikiem ścieków oczyszczonych), stawy stabilizacyjne, systemy bagienne (*wetland systems*),
- metody oparte na uproszczonym procesie osadu czynnego w warunkach tlenowych (reaktory przepływowe lub reaktory SBR) oraz metody oparte na procesie osadu czynnego w warunkach beztlenowych (reaktory UASB),
- metody oparte na złożach biologicznych (klasyczne, obrotowe).

Możliwości odprowadzania ścieków oczyszczonych wg powyższych metod przedstawiono w tabeli 1.

Metody wykorzystujące procesy naturalne

Oczyszczanie ścieków oparte na procesach naturalnych wymaga zawsze wstępnego podczyszczenia ścieków w osadnikach, którymi mogą być osadniki gnilne o czasie przetrzymania od 3 do 4 dób lub komory fermentacyjne o tej samej konstrukcji i czasie przetrzymania od 10 do 20 dób lub też innego rodzaju osadniki, np. osadniki Imhoffa. Objętość czynna osadnika gnilnego nie powinna być

Tabela 1. Metody oczyszczania i odprowadzania niedużych ilości ścieków

Metoda oczyszczania	Odbiorniki ścieków		
	grunt	wody powierzchni.	rolnicze ³ wykorzyst.
Osadniki gnilne (OG) lub komory fermentacyjne (KF)	+ ¹	-	+/-
OG lub KF + drenaż rozsączający	+ ¹	-	-
OG lub KF + poletka filtracyjne	+	+	+/-
OG lub KF + Wetland Systems	+	+	+
Stawy stabilizacyjne	+	+	+
Stawy napowietrzane	+	+	+
Osad czynny (zablokowane oczyszczalnie)	+	+	+
Złóża biologiczne ²	+	+	+

„+” – korzystny

¹ – dla ilości ścieków $\leq 5 \text{ m}^3/\text{d}$

„-” – niemożliwy

² – wymagana nityfikacja,

„+/-” – niekorzystny

³ – wymagana dezynfekcja ścieków

mniejsza niż 3 m^3 , a komory fermentacyjnej nie mniejsza niż 4 m^3 . Ścieki odprowadzane z obu tych urządzeń są zagniłe i wykazują tzw. niezwłoczne zapotrzebowanie tlenu. Skład ścieków oczyszczonych po osadnikach gnilnych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skład ścieków oczyszczonych odprowadzanych z osadników gnilnych [1]

Wskaźnik, jednostka	Zakres	Wartość średnia
BZT ₅ , gO ₂ /m ³	30÷280	140
ChZT, gO ₂ /m ³	70÷360	250
Zawiesiny, g/m ³	10÷270	90
Azot ogólny, gN/m ³	10÷120	45

Dla ścieków bytowo-gospodarczych w ilości poniżej $5 \text{ m}^3/\text{d}$ najprostszym układem oczyszczania wstępnie podczyszczonych ścieków w osadniku gnilnym lub komorze fermentacyjnej jest (za zgodą administracji państwowej) oczyszczanie w gruncie z wykorzystaniem drenażu rozsączającego. Drenaż rozsączający stosowany może być wszędzie tam, gdzie zwierciadło wody gruntowej znajduje się co najmniej 1,5 m poniżej dna przewodu drenarskiego. Średnica i materiał drenów jest taki sam jaki stosuje się przy odwadnianiu gruntów. Długość rur drenażu rozsączającego zależy od rodzaju gruntu. Wg Imhoffa [4] wartości te wynoszą:

- grunty piaszczyste – 10 m/M,
- grunty piaszczysto-gliniaste – 15 m/M,
- grunty gliniasto-piaszczyste – 20 m/M.

Drenaż rozsączający powinien być zasilany ściekami okresowo, co wymaga budowy dawkopnika ścieków lub pompy. W przypadku wyższego poziomu wód gruntowych stosowanie drenażu rozsączającego nie jest możliwe. Przy wyższym poziomie wód gruntowych lub ilościach ścieków powyżej $5 \text{ m}^3/\text{d}$, do doczyszczania ścieków po osadnikach wykorzystać można filtry gruntowe bez lub z recykulacją. Filtry te zapewniają wysoki stopień oczyszczania ścieków. Podawana w literaturze jakość ścieków oczyszczonych tą metodą przedstawiona jest w tabeli 3.

Modyfikacją procesu filtracji ścieków w warstwie gruntu jest połączenie zatopionego pola filtracyjnego z hodowlą roślin, czyli tzw. oczyszczalni korzeniowa. Układ ten należy do jednej z odmian systemu bagienno. Parametry oczyszczalni korzeniowych z trzci-

Tabela 3. Jakość ścieków oczyszczonych po filtrach gruntowych (wstępne podczyszczanie w osadnikach gnilnych)

Wskaźnik, jednostka	Bez recykulacji	Z recykulacją
BZT ₅ , gO ₂ /m ³	2÷8	4÷15
Zawiesiny, g/m ³	4÷12	3÷10
Azot amonowy, gN/m ³	0,3÷6,0	2÷8
Azot azotanowy, gN/m ³	17÷27	brak danych

nią mogą być następujące (obciążenie powierzchni i wysokość złoża)[2]:

– złoża o poziomym przepływie ścieków – $O_a \leq 10 \text{ m}^2/\text{M}$ i $h=0,6+1,0 \text{ m}$,

– złoża o pionowym przepływie ścieków – $O_a \leq 5 \text{ m}^2/\text{M}$ i $h=1,5+2,0 \text{ m}$,

– złoża o pionowo-poziomym przepływie ścieków – $O_a=2+5 \text{ m}^2/\text{M}$ i $h=1,5+2,0 \text{ m}$.

Oczyszczalnie wymagają znacznego czasu pracowania, który może wynosić do trzech lat. Według badań trzech trzcinowych oczyszczalni ścieków w Polsce, jakość ścieków oczyszczonych przyjmowała wartości zestawione w tabeli 4 [3]. Wadą oczyszczalni korzeniowych, jak wszystkich oczyszczalni typu *wetland systems*, jest obniżenie jakości ścieków oczyszczonych w okresie zimowym.

Tabela 4. Charakterystyka ścieków oczyszczonych z oczyszczalni korzeniowych o przepływie pionowym [3]

Wskaźnik, jednostka	Oczyszczalnia		
	A	B	C
Obciążenie, m ² /M	9,6	5,5	2,7
Wysokość warstwy filtr., m	0,8	0,8	0,8
BZT ₅ , gO ₂ /m ³	46	22	26
ChZT, gO ₂ /m ³	146	119	119
Zawiesiny, g/m ³	67	55	42
Azot ogólny, gN/m ³	36,7	45,0	-
Azot amonowy, gN/m ³	31,2	42,0	26,2
Fosfor ogólny, gP/m ³	6,7	3,2	2,8

Innym sposobem doczyszczania ścieków po osadnikach gnilnych lub oczyszczaniu mechanicznym (metody klasyczne lub sita) jest rolnicze wykorzystanie ścieków na polach nawadnianych z produkcją klasycznych upraw rolnych (trawa, zboże, rośliny przemysłowe) lub produkcją drzew (wierzba, wiklina itp.). Drugą grupę urządzeń opartych na procesach naturalnych są stawy ściekowe w układzie szeregowym lub szeregowo-równoległym. Wszystkie stawy wymagają zapewnienia szczelności zbiornika, który może być naturalny (istniejące stawy) lub sztuczny (uszczelniony gliną lub folią). Dla małych ilości ścieków stosuje się stawy stabilizacyjne o czasie przetrzymania od 90 do 120 dób. Dla większych ilości ścieków korzystniejsze są stawy napowietrzane, w których czas przetrzymania zmniejsza się do 12÷20 dób.

W krajach o korzystnych warunkach klimatycznych rozwijane są obecnie stawy stabilizacyjne z produkcją roślinną (np. hiacynt). W naszych warunkach klimatycznych próbuje się zastosować rzęsę wodną. Stawy stabilizacyjne z produkcją roślinną należą także do tzw. systemu bagienno. Stawy stabilizacyjne są prostą i łatwą oraz niezawodną w eksploatacji metodą oczyszczania ścieków. Do ich wad można natomiast zaliczyć wymaganą dużą objętość i powierzchnię oraz znaczne pogorszenie jakości odpływu podczas zimy.

Metody oparte na uproszczonym osadzie czynnym

Do oczyszczania ścieków w ilości do około 200 m³/d stosuje się najczęściej proces tlenowy z równoczesną tlenową stabilizacją osadu w komorze napowietrzania, natomiast dla większych ilości ścieków stabilizację osadu prowadzi się w odrębnych wydzielonych komorach. Zaletą tej metody jest wymagana nieduża powierzchnia oczyszczalni oraz wysoki i stabilny stopień oczyszczania ścieków. Oczyszczalnie te zapewniają bez problemu (jeśli są dobrze zaprojektowane) wymaganą w kraju jakość ścieków oczyszczonych. Wadą tej metody oczyszczania jest natomiast znacznie większe zużycie energii elektrycznej (0,3+1,0 kWh/m³d) niż w metodach opartych na procesach naturalnych. Oczyszczalnie wykorzystujące uproszczony proces osadu czynnego mogą pracować w układzie okresowym (reaktor SBR) lub przepływowym. Na metodzie tej opartych jest wiele produkowanych w kraju zblokowanych przepływowych małych oczyszczalni ścieków, jak np. BOS, SuperBOS, Bioblok, Biox, Sebiofikon itd. Reaktory SBR są korzystne do oczyszczania ścieków powstających okresowo, np. w przemyśle rolno-spożywczym, przy pracy na jedną lub dwie zmiany. Reaktory te są natomiast mniej korzystne do oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych, zwłaszcza pochodzących z grupy domów lub wsi czy też miasteczek. W tym ostatnim przypadku po reaktorze SBR wymagane jest stosowanie stawu doczyszczającego. Produkowane w kraju oczyszczalnie typu SBR to np. OBRA, Miniblok itd.

Beztlenowy osad czynny jest znacznie mniej efektywny od oczyszczania ścieków w warunkach tlenowych. Ścieki oczyszczone po procesie beztlenowym nie spełniają obowiązujących w kraju wymagań i konieczne jest ich doczyszczanie, najczęściej w urządzeniach wykorzystujących procesy naturalne (grunt, stawy) lub w tlenowym procesie osadu czynnego. Do oczyszczania większych ilości ścieków surowych nadają się reaktory typu UASB, natomiast dla ścieków po mechanicznym podczyszczeniu – złoża zatopione lub fluidalne.

Metody oparte na złożach biologicznych

Złoża biologiczne są alternatywnym układem oczyszczania ścieków w stosunku do procesu osadu czynnego. Są to urządzenia wymagające znacznie mniej energii elektrycznej niż proces osadu czynnego, lecz równocześnie zapewniają niższy stopień oczyszczania ścieków. Przy zachowaniu niskich parametrów technologicznych w warunkach tlenowych możliwe jest otrzymanie wymaganej jakości ścieków. Dla małych ilości ścieków stosować można złoża zatopione tlenowe, złoża zraszane niskoobciążone lub złoża obrotowe (RBC). Dla większych ilości ścieków stosuje się klasyczne rozwiązania złożów zraszanych czy też splukiwanych lub złoża obrotowe. Obecnie preferuje się wypełnienia złożów z tworzyw sztucznych

Tabela 5. Wskaźniki jednostkowe dla urządzeń do biologicznego oczyszczania ścieków

Metoda oczyszczania	Wskaźnik jednostkowy
Osadnik gnilny	0,5+0,6 m ³ /M
Drenaż rozszczapający	5+10 m ² /M
Filtry gruntowe	4+5 m ² /M
Rolnicze wykorzystanie ścieków	50+200 m ² /M
Stawy korzeniowe trzcinowe	5+10 m ² /M
Stawy stabilizacyjne	20+25 m ³ /M
Stawy napowietrzane	2+4 m ³ /M
Złoża biologiczne niskoobciążone	0,1+0,2 m ³ /M
Złoża tarczowe	2+3 m ² /M
Komory osadu czynnego z tlen. stab. osadu	0,2+0,3 m ³ /M

w formie pakietów lub wypełnienie z materiału luźnego w bębnach (odmiana złożów obrotowych). Przedstawione powyżej metody oczyszczania ścieków wymagają różnych powierzchni i objętości urządzeń, co wpływa istotnie na koszty inwestycyjne. W tabeli 5 przedstawiono szacunkowe wartości jednostkowe podstawowych urządzeń stosowanych w małych oczyszczalniach ścieków. Efektywność i niezawodność pracy oraz zużycie energii przez seryjnie produkowane w kraju małe oczyszczalnie, oparte na procesie osadu czynnego lub złożach obrotowych, omówiono np. w pracy [6].

Średnie i duże oczyszczalnie ścieków

W średnich i dużych oczyszczalniach ścieków wdraża się najczęściej technologie zapewniające wysoki stopień oczyszczania, z równoczesną minimalizacją kosztów eksploatacyjnych i inwestycyjnych. Jedną z dróg minimalizacji kosztów jest intensyfikacja biologicznego oczyszczania ścieków poprzez stosowanie:

- wysoko efektywnych układów jednostopniowych,
- układów wielostopniowych,
- immobilizacji biomasy na nośnikach.

Układy jednostopniowe

Dominującym kierunkiem w technologii oczyszczania ścieków jest obecnie usuwanie węgla oraz azotu i fosforu w procesach biologicznych. W układach jednostopniowych stosuje się:

- nityfikację i denityfikację (usuwanie węgla i azotu),
- biologiczną defosfatację (niepełne usuwanie węgla oraz biologiczne usuwanie fosforu),
- biologiczną defosfatację z nityfikacją i denityfikacją (usuwanie węgla, azotu i fosforu).

W układach tych bardzo często wprowadza się uzupełniające chemiczne symultaniczne strącanie fosforanów, jeśli biologiczne usuwanie fosforu nie zapewnia uzyskania dopuszczalnej zawartości tego pierwiastka w ściekach oczyszczonych.

Nityfikacja i denityfikacja

Usuwanie azotu w procesie denityfikacji jest już właściwie rozwiązaniem klasycznym. Jest to obecnie podstawowy układ oczyszczania ścieków, który zapewnia nie tylko wysoki stopień usuwania związków azotu i węgla, lecz także zmniejszenie zapotrzebowania na tlen (odzysk tlenu w komorze denityfikacji). Układy z denityfikacją są stabilne i prawidłowo obliczone gwarantują założony stopień usuwania zanieczyszczeń.

W skali technicznej najczęściej stosuje się układ z komorą denityfikacji na początku i następnie komorą nityfikacji. Odpowiednie stężenie azotanów w komorze denityfikacji zapewnia recyrkulacja osadu oraz tzw. recyrkulacja wewnętrzna (z komory nityfikacji). Parametry technologiczne tego układu zależą od jakości ścieków surowych oraz wymaganej ilości azotu w ściekach oczyszczonych.

Dla typowych ścieków miejskich i obowiązujących w Polsce norm jakości ścieków oczyszczonych, sumaryczny czas przetrzymania w komorze osadu czynnego wynosi 14+18 h (dla temp. 10°C), z czego około 1/3 stanowi czas przetrzymania w komorze denityfikacji. Parametry te dotyczą zawartości osadu czynnego w przedziale 3.000+3.500 gsm/m³. Jednostopniowy układ nityfikacyjno-denityfikacyjny nie zapewnia najczęściej wymaganej zawartości fosforu w ściekach oczyszczonych. Najczęściej do usuwania fosforu w tym układzie stosuje się wspomagające symultaniczne strącanie fosforanów.

Biologiczna defosfatacja

Usuwanie fosforu na drodze biologicznej nie jest jeszcze w pełni rozpoznane. Proces ten jest często niestabilny i wrażliwy na różne czynniki zakłócające. Biologiczne usuwanie fosforu wymaga kompromisu pomiędzy stopniem oczyszczania ścieków a stopniem usuwania fosforu. Ładunek fosforu usuwany w komorach osadu czynnego jest funkcją zwiększonej zawartości fosforu w biomasie oraz dobowej masy osadu nadmiernego usuwanego poza układ. Zwiększenie stopnia oczyszczania ścieków powoduje zmniejszenie dobowego przyrostu osadu nadmiernego, a tym samym zmniejszenie usuwanego ładunku fosforu. Mechanizm ten wpływa także na zawartość fosforu w ściekach oczyszczonych. Dlatego też ścieki o wysokiej zawartości fosforu (wysokie wartości stosunku P/BZT₅) charakteryzują się niższym stopniem usuwania tego pierwiastka.

Układy technologiczne z biologicznym usuwaniem fosforu zapewniają niższy stopień usuwania związków węgla niż układy z usuwaniem związków azotu lub azotu i fosforu. Wynika to z faktu, iż układy technologiczne z defosfatacją nie zezwalają na proces nityfikacji, ponieważ azotany inhibują nadmiarowe wbudowywanie fosforu w biomasę. Do podstawowych układów technologicznych do usuwania fosforu na drodze biologicznej zalicza się:

- układ Phostrip z biologicznym wbudowywaniem fosforu i chemicznym strącaniem fosforanów z cieczy nadosadowej; układ ten nie jest obecnie zalecany do stosowania,
- układ A/O z komorą beztlenową i komorą tlenową; jest to układ sprawdzony i zalecany do stosowania.

Układ A/O nie zapewnia wymaganej w Polsce jakości ścieków oczyszczonych, natomiast może być (np. oczyszczalnia ścieków w Koszalinie) pierwszym etapem przed realizacją jednoosadowego układu do pełnej biologicznej defosfatacji i denitryfikacji ścieków.

Biologiczne usuwanie węgla, azotu i fosforu

Do podstawowych układów technologicznych do usuwania związków węgla, azotu i fosforu na drodze biologicznej zalicza się:

- układ A₂/O, nazywany często układem Phoredox, wraz z różnymi modyfikacjami, np. wstępną denitryfikacją osadu recykulowanego (np. oczyszczalnia ścieków w Poznaniu),
- układ Bardenpho wraz z modyfikacjami,
- układ UCT.

Układy te łączą w sobie procesy biologicznej defosfatacji z procesami nityfikacji i denitryfikacji. Układy do biologicznego usuwania związków węgla, azotu i fosforu wymagają największych objętości komór osadu czynnego. Układy te są obecnie powszechnie stosowane w średnich i dużych oczyszczalniach ścieków. Prawie wszystkie projektowane w Polsce oczyszczalnie ścieków opierają się na jednym z tych układów (np. Brzeg, Żywiec, Wrocław,

Gdańsk). Układy te są również powszechnie stosowane w krajach zachodnich. Jakość ścieków oczyszczonych uzyskiwaną w jedno-stopniowych układach osadu czynnego przedstawiono w tabeli 6.

Układy wielostopniowe

Do stosowanych praktycznie wielostopniowych układów oczyszczania ścieków należą:

- złoża biologiczne + osad czynny (nityfikacja+denitryfikacja), najczęściej bez osadnika pośredniego,
- wielostopniowy osad czynny (np. układ A/O jako I^o i układ nityfikacyjno-denitryfikacyjny jako II^o),
- wielostopniowe złoża biologiczne, głównie dla złóż obrotowych (RBC).

Pierwszy i drugi układ stosowane są głównie przy rozbudowie istniejących oczyszczalni ścieków w celu zwiększenia ich przepustowości lub zwiększenia stopnia oczyszczania ścieków (np. oczyszczalnie w Bogatyni i Lubinie). Układy te, jak również układ trzeci, mogą być również stosowane w nowo projektowanych oczyszczalniach (np. dla Chojnowa). Zaletą układów wielostopniowych jest zmniejszenie objętości urządzeń. W pracy [8] wykazano, że drugi układ (dwustopniowy) zmniejsza objętość urządzeń o minimum 30 % w stosunku do układu jednostopniowego. Układy wielostopniowe wymagają stosowania rachunku optymalizacyjnego, ponieważ sumaryczna objętość urządzeń jest funkcją stopnia oczyszczania ścieków w każdym stopniu.

Projektowanie wielostopniowych układów do oczyszczania ścieków wymaga zastosowania metod modelowania matematycznego, gdyż standardowe zależności, np. zależność stopnia oczyszczania ścieków od obciążenia osadu, nie nadają się zupełnie do tego celu.

Immobilizacja biomasy na nośniku

Zawartość zanieczyszczeń w odpływie, dla dowolnego układu biologicznego oczyszczania ścieków, zależy od wieku osadu. Z kinetyki procesów biologicznych wynika, że zmniejszenie czasu hydraulicznego przetrzymania w reaktorze, przy założeniu stałości wieku osadu, jest możliwe jedynie przez zwiększenie zawartości biomasy. To zwiększenie zawartości biomasy realizuje się często poprzez jej immobilizację na nośniku. Przykładem takiej immobilizacji biomasy są wszystkie złoża biologiczne (tlenowe, beztlenowe), jak też i reaktory z zawieszonym osadem (UASB). W ostatnich latach immobilizacja biomasy jest powszechnie wykorzystywana przy beztlenowym oczyszczaniu ścieków. Obecnie w niektórych oczyszczalniach ścieków w krajach zachodnich testuje się wpływ pakietów umieszczonych w komorach nityfikacyjnych osadu czynnego na efekty oczyszczania ścieków. Innym przykładem zwiększania zawartości biomasy na drodze immobilizacji (w warunkach tlenowych) są małe oczyszczalnie typu Sebiofikon, w których do komór osadu czynnego wprowadzono siatki z tworzywa sztucznego.

Modyfikacja systemów mieszania i napowietrzania

Zarówno w małych jak i dużych oczyszczalniach ścieków napowietrzanie jest procesem wpływającym istotnie na zużycie energii. Podstawowe kierunki rozwoju systemów napowietrzających, minimalizujących zużycie energii, polegają na:

- zwiększeniu stopnia wykorzystania tlenu, które realizuje się poprzez stosowanie dyfuzorów, w tym także dyfuzorów membranowych o wielu zaletach; innym sposobem jest zwiększenie czasu kontaktu pęcherzyka gazu ze ściekami, co uzyskuje się np. w tzw. reaktorach studniowych (*deep shaft reactor*), dość głębokich ko-

Tabela 6. Efekty oczyszczania ścieków z biologicznym usuwaniem fosforu i azotu

Wskaźnik, jednostka	System A/O	Nityfikacja i denitryfikacja	System A ₂ /O
ChZT, gO ₂ /m ³	20+80	20+50	20+60
BZT ₅ , gO ₂ /m ³	14+18	5+18	4+13
Zawiesiny, g/m ³	10+15	5+15	4+15
Azot ogólny, gN/m ³	19+30	6+20	5+18
Azot amonowy, gN/m ³	10+15	0,4+3,0	1,0+3,0
Azot organiczny, gN/m ³	–	1+12	1+3
Azot azotanowy, gN/m ³	1+2	1,5+7,0	2+10
Fosfor ogólny, gP/m ³	3+5	2+6	1+3

morach osadu czynnego (do 5 m); zwiększenie stopnia wykorzystania tlenu zapewnia również równomierne rozmieszczenie dyfuzorów na dnie komory (rozwiązanie to jest często stosowane przy dyfuzorach membranowych),

- utrzymywaniu stałej zawartości tlenu w komorze, które realizuje się poprzez zastosowanie sterowanych sondami tlenowymi regulatorów częstotliwościowych przy dmuchawach lub aeratorach (płynna regulacja obrotów i zużycia energii),

- stosowaniu układów mieszanych, tj. mieszania komory np. wirownicami z równoczesnym napowietrzaniem sprężonym powietrzem; alternatywnym układem (jednak znacznie mniej efektywnym) są komory korytarzowe napowietrzane walcami klatkowymi i aeratorami powierzchniowymi.

Przeróbka i unieszkodliwianie osadów

Osady powstające podczas oczyszczania ścieków stanowią zawsze istotny problem eksploatacyjny dla każdego użytkownika oczyszczalni.

Małe oczyszczalnie ścieków

Najprostsze unieszkodliwianie osadów z oczyszczalni dla pojedynczych domów lub grupy domów polega na wywożeniu z nich osadu (uwodnionego) samochodami asenizacyjnymi do dużej oczyszczalni ścieków, natomiast dla oczyszczalni ścieków o przepustowości do 2.000 m³/d najwłaściwszą metodą przeróbki osadów jest klasyczna tlenowa lub termofilowa tlenowa stabilizacja. Wdrożona w Niemczech wysoko temperaturowa tlenowa stabilizacja osadów [11] wykorzystuje to samo zjawisko, które zapewnia samoogrzanie nawozu lub odpadów podczas kompostowania. W warunkach tlenowych samoogrzanie osadu wystąpi samorzutnie, jeżeli zawartość związków organicznych w doprowadzanym do komór stabilizacji osadzie surowym jest większa od 2,5 % [2]. Proces ten, z uwagi na temperaturę (ok. 65 °C) gwarantuje również naturalną pasteryzację osadu. Mankamentem tego procesu jest pienienie osadu w komorze oraz jego uciążliwość zapachowa, co wymaga dezodoryzacji gazów odlotowych. Po stabilizacji tlenowej (klasycznej, termofilowej) osady poddaje się następującym procesom:

- odwadniania naturalnego na poletkach lub lagunach,
- odwadniania mechanicznego w przewoźnych stacjach obsługujących kilka małych oczyszczalni,
- kompostowania wraz z odpadami organicznymi (słoma, trociny itp),
- kompostowania wraz z odpadami organicznymi i z hodowlą dżdżownic,
- mieszania z wapnem (mieszanka osadowo-wapienna).

W krajach zachodnich preferuje się rolnicze wykorzystanie osadu z małych oczyszczalni ścieków, pod warunkiem ich dezaktywacji biologicznej oraz braku w osadzie substancji szkodliwych (metale ciężkie, specyficzne substancje organiczne). Dezaktywację biologiczną osadów zapewniają procesy pasteryzacji, kompostowania oraz mieszania z wapnem, przy czym kompostowanie osadu wymaga doprowadzenia dodatkowego źródła węgla organicznego (trociny, kora, odpady komunalne itd). Stosunek objętościowy składników dla osadu o uwodnieniu 75 % wynosi 1:0,25:12,5 (osad:trociny:recykulat) lub 1:1,5 (osad:trociny). Przy higienizacji osadów wapnem jego niezbędne dawki wynoszą 150÷250 gCa(OH)₂/kg suchej masy osadu (50÷60 gCa(OH)₂/kg osadu o uwodnieniu 80 %), natomiast przy stabilizacji osadu wapnem (sto-

suje się najczęściej CaO) dawki te wynoszą od 0,5 do 1,0 kgCaO/kg suchej masy osadu, w zależności od uwodnienia osadu (im większe uwodnienie tym większa dawka wapna). Podczas wapnowania osadu wapnem palonym spełnić należy następujące warunki: utrzymanie temperatury mieszaniny osadowo-wapiennej w granicach 55÷70 °C przez minimum 24 h oraz początkowe pH≥12,5.

Stwierdzić należy, że w Polsce nie jest dopuszczalne (brak przepisów prawnych) bezpośrednie rolnicze wykorzystanie osadów ustabilizowanych, ani też rolnicze wykorzystanie osadów po higienizacji. Dopuszczalne jest natomiast rolnicze wykorzystanie kompostu. Również w naszym kraju nie są dotychczas określone kryteria dopuszczenia osadów do składowania na wysypiskach.

Średnie i duże oczyszczalnie ścieków

W średnich oczyszczalniach ścieków (Q>5.000 m³/d) stosuje się powszechnie jednostopniową fermentację metanową osadów w otwartych lub zamkniętych komorach fermentacyjnych. Wybór sposobu fermentacji w tych oczyszczalniach zależy tylko od kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, natomiast w oczyszczalniach dużych stosuje się powszechnie wielostopniowe układy stabilizacji osadów z odzyskiem gazu fermentacyjnego.

Klasycznym rozwiązaniem układu wielostopniowego jest dwustopniowa fermentacja osadu. Pierwszy stopień polega na fermentacji mezofilowej w zamkniętych komorach fermentacyjnych z odzyskiem gazu, natomiast drugi na fermentacji psychrofilowej w otwartych komorach fermentacyjnych. Próby rozdzielania fermentacji na dwa stopnie: fermentację kwaśną (I^o) i fermentację metanową (II^o) okazały się mało efektywne i eksploatacyjnie nieciekawe. Inną możliwością intensyfikacji biologicznej stabilizacji osadów jest połączenie tlenowej stabilizacji z fermentacją metanową.

Badania wykazały, że układ dwustopniowy: fermentacja metanowa (I^o) i tlenowa stabilizacja (II^o) jest nieekonomiczny. Znacznie korzystniejszy okazał się układ odwrotny, tj. tlenowa stabilizacja (I^o) i fermentacja metanowa (II^o). Układ ten zakłada termofilową tlenową stabilizację w pierwszym stopniu o czasie przetrzymania około 1 doby oraz mezofilową fermentację w drugim stopniu o czasie przetrzymania od 10 do 15 dób. Odpowiednie ocieplenie reaktora drugiego stopnia (fermentacja z odzyskiem gazu) powoduje, że nie jest potrzebne jego ogrzewanie. Układ ten zapewnia także naturalną dezynfekcję osadów, co znacznie ułatwia ewentualne jego rolnicze wykorzystanie.

Do układów wielostopniowych zaliczyć można także połączenie przeróbki osadów z kompostowaniem odpadów. Badania i eksploatacja wielu instalacji wykazały, że korzystne jest kompostowanie wraz z odpadami odwodnionych osadów po fermentacji lub tlenowej stabilizacji. Znacznie mniej korzystne, jakkolwiek możliwe, jest kompostowanie odwodnionych osadów surowych.

Modyfikacje systemów mieszania osadów

Zapewnienie dużej jednorodności masy osadów, zwłaszcza w komorach fermentacyjnych, przy równoczesnym *quasi* ciągłym doprowadzaniu osadu surowego pozwala na znaczne zmniejszenie czasu przetrzymania. Przykładowo, przy spełnieniu tych warunków, czas fermentacji w temperaturze 30 °C skraca się z 30 dób (fermentacja klasyczna) do 14 dób. Intensywne mieszanie w komorach fermentacyjnych realizuje się najczęściej za pomocą mieszadeł zewnętrznych (dwa do czterech mieszadeł na jedną komorę). Intensywne mieszanie komór wymagane jest także w termofilowej tlenowej stabilizacji osadów, jak również w układzie tlenowo-beztlenowym.

Podsumowanie

Podstawowe kierunki wdrażanych w kraju technologii oczyszczania ścieków zmierzają do minimalizacji objętości reaktorów, minimalizacji zużycia energii oraz zwiększenia stopnia i rodzaju usuwanych zanieczyszczeń. Zasadniczym sposobem w osiągnięciu tych celów jest intensyfikacja biologicznego oczyszczania ścieków, intensyfikacja biologicznej stabilizacji osadów, modyfikacja rozwiązań technicznych komór osadu czynnego oraz modernizacja systemów ich napowietrzania i mieszania. Stosowane rozwiązania nie są uniwersalne lecz wymagają uwzględnienia wielkości oczyszczalni. Równoległym kierunkiem wdrażanych technologii oczyszczania ścieków i przeróbki osadów jest modelowanie matematyczne procesów jednostkowych. Modelowanie to pozwala na projektowanie oraz na optymalizację poszczególnych urządzeń, jak również całego systemu oczyszczania ścieków wraz z przeróbką osadów.

LITERATURA

1. Design Manual. Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems. EPA, Washington DC 1980.
2. R. BŁĄŻEJEWSKI, T. JAROSZYŃSKI: Złóża trzciniowe – proste i tanie oczyszczalnie ścieków. Mat. konf. „Gospodarka ściekami i odpadami w gminach”, PZITS, Poznań 1993, ss. 97-103.
3. L. KALISZ, J. SAŁBUT: Wykorzystanie roślin korzeniowych do oczyszczania ścieków. Mat. konf. „Gospodarka ściekami i odpadami w gminach”, PZITS, Poznań 1993.
4. K. IMHOFF: Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków. Poradnik. Arkady, Warszawa 1982.
5. K. BIRDEKAL, H. BRIX, N.H. JOHANSEN: Wastewater treatment in constructed wetlands – designers manual. Femmoeller, Gdańsk 1993.
6. K. SZCZĘŚNY: Efektywność usuwania zanieczyszczeń w istniejących małych oczyszczalniach ścieków. Mat. konf. „Gospodarka ściekami i odpadami w gminach”, PZITS, Poznań 1993, ss. 109-127.
7. Metcalf & Eddy: Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, Reuse. McGraw-Hill, New York 1991.
8. K. BARTOSZEWSKI: Wielostopniowe oczyszczanie ścieków osadem czynnym. Mat. konf. „Postęp Techniczny w Dziedzinie Oczyszczania Ścieków”, PZITS, Katowice 1988.
9. W.J. JEWELL, R.M. KABRICK: Autoheated aerobic thermophilic digestion with aeration. Journal WPCF, 1980, Vol. 52, No. 3, pp. 512-523.
10. T. MARCINKOWSKI: Odkazanie osadów ściekowych tlenkiem wapniowym. Praca doktorska, Inst. Inż. Ochr. Środow. PWr., Wrocław 1984 (praca nie publikowana).
11. Environmental Regulations and Technology: Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion of Municipal Wastewater Sludge. EPA Reports, 1990, No. EPA/625/10-90/007.
12. J. BERNACKA, J. KURBIEL, L. PAWŁOWSKA: Usuwanie związków biogennych ze ścieków miejskich. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa 1992.
13. Upgrading of Wastewater Treatment Plants. Proc. of „International Specialized Conference”, Munich 1989.

Technologies of Wastewater Treatment and Sludge Processing in Poland

Discussed are the treatment technologies for the sewage treatment plants operated in Poland: domestic plants ($Q < 5 \text{ m}^3/\text{d}$), small plants ($Q < 500 \text{ m}^3/\text{d}$), and units larger than the aforementioned. The majority of domestic and small treatment plants make use of natural processes (e.g., in soils or wetland systems) or a simplified activated sludge process. In medium-size and large sewage treatment plants the activated sludge process (with biological removal of phosphates and biological denitrification) dominates. An alternative procedure is a two-stage system involving phosphate removal at stage one, and biological nitrification/denitrification at stage two, respectively. Most of the sewage treatment plants operated in Poland intend to implement

routine precipitation of phosphates. A general trend in sewage treatment is to minimize power demand. This should be attempted by implementing effective aeration systems, by adequate control of oxygen in the activated sludge tank, or by intensification of methane digestion (together with gas recovery) in the sewage treatment plant. Sludge processing creates serious problems, since relevant regulations (e.g. those pertaining to agricultural uses) are lacking. In Poland use is made of conventional methods for sludge processing and disposal. However, a number of facilities are not available (e.g., sludge composters or mobile thickening stations), and there is poor interest in the agricultural application of sewage sludges after lime treatment.