



Wpływ intensywności napowietrzania na biocenozę i funkcjonowanie osadu czynnego

Maria Hul, Adam Drzewicki

Zakład Ekologii i Hydrobiologii Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

The influence of aeration intensity on biocenosis and activated sludge function

Summary

The research was carried out in a conventional sewage treatment plant equipped with completely mixed reactors, located in Olsztyn. The main problem was that it was impossible to simultaneously achieve high treatment efficiency and appropriate sedimentation of the activated sludge. The observations were made at different levels of aeration intensity, controlled by the depth of the mechanical surface aerator submersion.

The study confirmed a positive effect of the intensive aeration on the process efficiency and the structure of microfauna and a negative effect on the sedimentation of the activated sludge. The increase of the dissolved oxygen concentration from $1.2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ to $3.0\text{-}3.3 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ was accompanied by a 10% growth of COD reduction (from 72-75% to 80-89%), 2-fold increase of ciliates species diversity (from 4-7 to 8-12 taxa), including predators, and the rise of the SVI value from 73 to 441 $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$. It was recorded that a higher aeration rate results in the flocs lightness, as a consequence of air saturation, and the development of filamentous microorganisms, mainly *Microthrix parvicella* and Type 1851. The double mechanism of sedimentation disturbances was indicated by the decline of the SVI value to about 200 $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$ recorded after emerging of aerators irrespective of the same number of filaments.

Foam was thought to be the primary proliferation area of low F:M filamentous microorganisms and it appeared as a result of excessive turbidity in the reactors. Foam contained a large amount of *M. parvicella* and Type 1851. Foam removal by means of water stream at the initial stage of its formation seems to be the most effective method to prevent the bulking of the activated sludge.

Key words:

activated sludge, aeration intensity, filamentous microorganisms, microfauna, bulking, foaming, *Microthrix parvicella*, Type 1851.

Adres do korespondencji

Maria Hul,
Zakład Ekologii
i Hydrobiologii,
Uniwersytet
Warmińsko-Mazurski,
ul. Oczapowskiego 5,
10-957 Olsztyn.

biotechnologia

1. Wstęp

Poważnym problemem eksploatacyjnym w miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie jest puchnięcie osadu czynnego. Z wieloletnich obserwacji wynika, że zjawisko to nasila się szczególnie w okresach intensywnego napowietrzania ścieków z osadem czynnym w komorach aeracji, a towarzyszy temu masowy wzrost mikroorganizmów nitkowatych. Przy zmniejszonej aeracji sedymentacja osadu w osadnikach wtórnych znacznie się poprawia, co – jak się wydaje – jest skutecznym sposobem kontroli puchnięcia osadu. W takich warunkach maleje jednak często sprawność usuwania związków organicznych.

Mikroorganizmy nitkowane powodujące puchnięcie osadu czynnego w oczyszczalni olsztyńskiej nie były dotąd identyfikowane. Obecny stan wiedzy dotyczący wymagań środowiskowych rozlicznych typów pozwala w wielu przypadkach ograniczyć puchnięcie nitkowane, czasem prostymi zabiegami operacyjnymi (1-3). Podstawą podjęcia działań jest jednak prawidłowe rozpoznanie szczepów.

Celem niniejszych badań była identyfikacja mikroorganizmów odpowiedzialnych za puchnięcie osadu czynnego w oczyszczalni olsztyńskiej oraz próba wyjaśnienia przyczyn ich masowego wzrostu. Badaniem objęto również mikrofaunę osadu czynnego zakładając, że może dostarczyć dodatkowych informacji o warunkach oczyszczania ścieków w komorach aeracji. Badania prowadzono przy różnej intensywności napowietrzania ścieków z osadem czynnym, regulowanej stopniem zanurzenia aeratorów w ściekach.

2. Teren i metody badań

2.1. Teren badań

Miejska Oczyszczalnia Ścieków w Olsztynie, oczyszczająca dziennie ok. 42 000 m³ ścieków jest wyposażona w komorę krat, 2 piaskowniki, 2 osadniki wstępne, 3 komory napowietrzania z pełnym wymieszaniem (trzecia aktualnie remontowana) oraz 2 osadniki wtórne. Osady ściekowe są unieszkodliwiane w komorach fermentacji, a w końcowym etapie na poletkach osadowych. Wody pofermentacyjne kierowane są do osadników wstępnych. Odbiornikiem ścieków oczyszczonych jest rzeka Łyna.

Każda komora z osadem czynnym o pojemności 5400 m³ jest wyposażona w 4 stacjonarne aeratory powierzchniowe. Zdolność natleniania pojedynczej turbiny, przy zanurzeniu w ściekach na głębokość od 0 do 10 cm, wynosi wg projektu technicznego 84 kg · h⁻¹ O₂. Zmian aeracji dokonuje się przez spiętrzenie ścieków w komorze. Maksymalne zanurzenie turbin wynosi ok. 25 cm. Stężenie tlenu rozpuszczonego mierzy się sondą tlenową.

Badania prowadzono od marca do lipca 1998 r. w trzech etapach.

W marcu i kwietniu (etap I) w oczyszczalni utrzymywano projektową głębokość zanurzenia turbin, tj. 0-10 cm. Z początkiem maja podwyższono poziom ścieków w komorach o 20 cm, uzyskując maksymalną turbulencję (etap II). W czerwcu ponownie obniżono lustro ścieków do pierwotnego poziomu (etap III). Na początku lipca awaria turbiny zdestabilizowała pracę oczyszczalni i uniemożliwiła dalsze obserwacje osadu czynnego.

2.2. Fizyczno-chemiczna charakterystyka ścieków i osadu czynnego (wg danych laboratorium oczyszczalni ścieków)

Wyniki fizyczno-chemicznej analizy ścieków i osadu czynnego oraz wybrane parametry technologiczne zamieszczono w tabeli 1. Podstawą oceny efektywności oczyszczania ścieków jest dotychczas redukcja związków organicznych. Normy dla ścieków oczyszczonych zawarte w obowiązującym do 2001 r. pozwoleniu wodno-prawnym wynoszą: ChZT – $63 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, BZT₅ – $42 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ i zawiesiny ogólne – $56 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Tabela 1

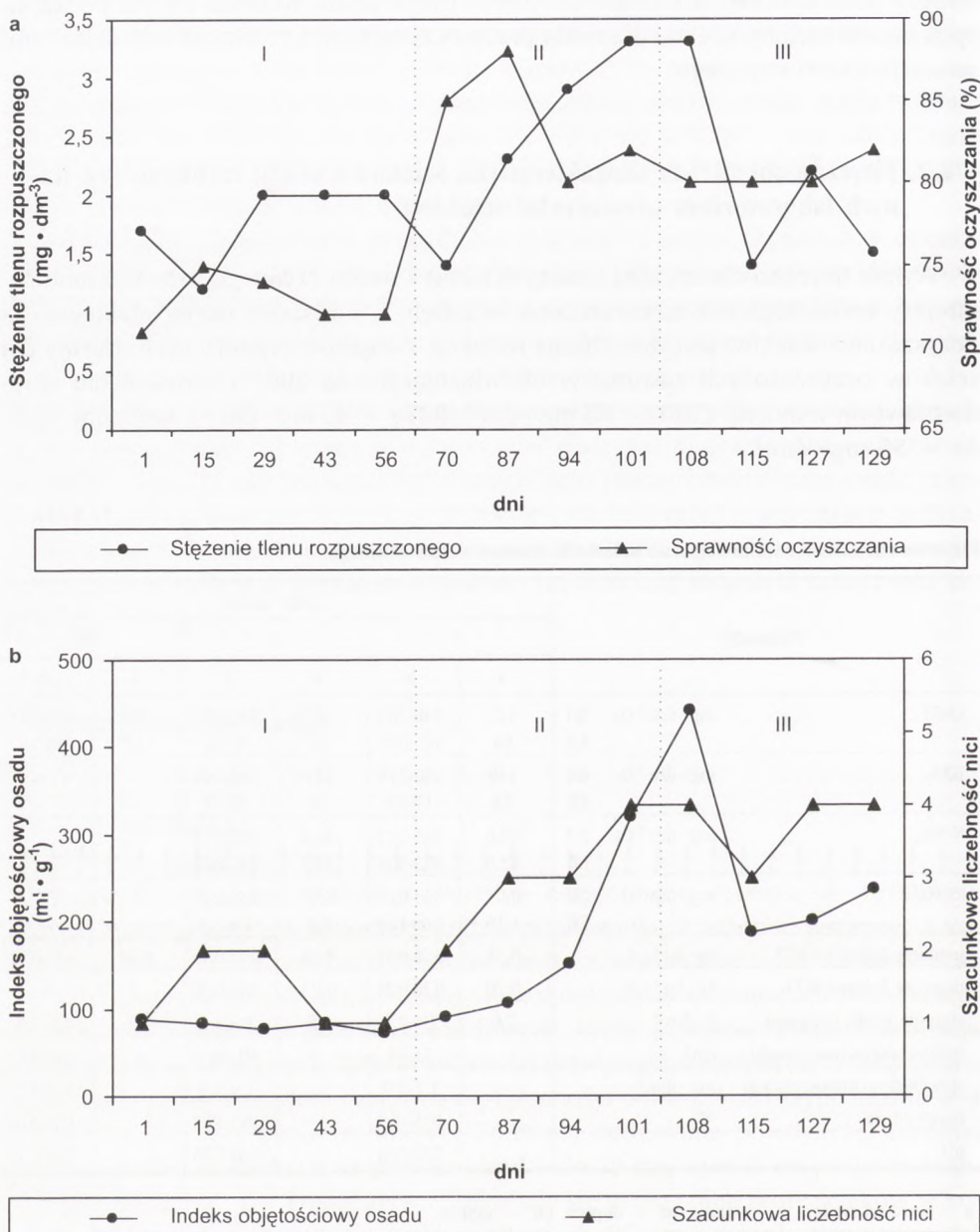
Fizyczno-chemiczne i technologiczne wskaźniki procesu osadu czynnego

Parametry			Etapy badań					
			I		II		III	
			a	b	a	b	a	b
ChZT	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3} \text{O}_2$	Inf	327	246-382	267	221-371	253	224-282
		Eff	84	67-100	47	28-56	52	48-56
BZT ₅	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3} \text{O}_2$	Inf	146	120-170	116	100-140	–	–
		Eff	24	17-29	14	11-17	–	–
N-NH ₄	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3} \text{O}_2$	Inf	53,6	38,5-62,5	40,6	30,0-47,0	–	–
		Eff	42,0	37,2-50,8	22,2	19,6-28,0	–	–
N-NO ₃	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3} \text{O}_2$	Inf	0,61	0,53-0,69	0,57	0,30-0,99	–	–
		Eff	1,16	0,46-1,65	6,7	4,8-7,5	–	–
usunięty ładunek ChZT	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}$		0,38	0,26-0,44	0,48	0,42-0,56	0,49	0,46-0,52
usunięty ładunek BZT ₅	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}$		0,20	0,16-0,24	0,23	0,18-0,26	–	–
stężenie osadu czynnego	$\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$		2,6	2,4-2,8	1,8	1,5-2,2	1,6	1,5-1,7
indeks objętościowy osadu	$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$			71-84		91-441		188-237
stężenie tlenu rozpuszczonego	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$			1,2-2,0		1,4-3,3		1,4-2,2
temperatura	$^{\circ}\text{C}$			10,5-16,5		16,5-18,1		17,8-20,0
pH				7,24-7,64		7,34-7,76		7,39-7,69

a – wartości średnie, b – zakres, Inf – dopływ, Eff – odpływ.

Z uzyskanych informacji wynika, że do początków maja do komór z osadem czynnym dopływały ścieki bardziej stężone niż w późniejszym okresie. Było to spo-

wodowane dużym udziałem wód z przecięzonych w porze zimowej komór fermentacji osadów ściekowych. W marcu i kwietniu (etap I) wartość ChZT w ściekach



Rys. 1. Związek pomiędzy: a) stężeniem tlenu rozpuszczonego a sprawnością usuwania ChZT, b) indeksem objętościowym osadu czynnego a szacunkową liczebnością mikroorganizmów nitkowatych.

oczyszczonych regularnie przekraczała dopuszczalną normę, pomimo że stężenie tlenu w komorze aeracji utrzymywało się w zakresie od 1 do 2 mg · dm⁻³ (rys.1a). Korzystnie przedstawiały się natomiast fizyczne parametry osadu czynnego. Opadalność osadu po 30 min sedimentacji wynosiła ok. 200 ml · dm⁻³, a indeks osadowy poniżej 85 ml · g⁻¹ (rys. 1b).

Po spiętrzeniu ścieków w komorze (etap II) nastąpił stopniowy wzrost stężenia tlenu rozpuszczonego do ponad 3 mg · dm⁻³ i poprawa efektywności usuwania związków organicznych i azotu amonowego (tab. 1). Usunięty ładunek ChZT wzrósł średnio o 26% (z 0,38 do 0,48 kg · kg⁻¹ · d), a usunięty ładunek BZT₅ o 15% (z 0,20 do 0,23 kg · kg⁻¹ · d). Pogorszyły się natomiast właściwości fizyczne osadu. 5 czerwca opadalność wyniosła 695 ml · dm⁻³, a indeks osadowy 441 ml · g⁻¹. Na powierzchni komór pojawiła się trwała piana.

Ponowne obniżenie lustra ścieków (etap III) pociągnęło za sobą znaczną poprawę sedimentacji osadu czynnego. Indeks osadowy oscylował wokół 200 ml · g⁻¹. Do końca czerwca wydajność procesu i jakość odpływu, mierzone wielkością ChZT utrzymywały się na nie zmienionym poziomie i w granicach dopuszczalnych norm, pomimo obniżenia stężenia tlenu w komorze aeracji.

W całym okresie badań odczyn ścieków w komorze aeracji był słabo alkaliczny (pH = 7,2-7,8). Temperatura ścieków wzrastała stopniowo od 10°C w marcu do 20°C w połowie czerwca.

2.3. Metodyka badań biologicznych

Mikroskopową analizę osadu czynnego prowadzono początkowo dwa razy w miesiącu. Począwszy od maja analizy wykonywano co tydzień. Łącznie opracowano 13 próbek osadu czynnego.

Skład gatunkowy i ilościowy mikrofauny ustalano przyżyciowo. Pierwotniaki, których identyfikacja nie wymaga specjalnych technik barwienia, oznaczano do gatunku (4). Pozostałe mikroorganizmy oznaczano do rodzaju lub wyższej jednostki taksonomicznej (5,6).

Liczebność małych wiciowców określano wzdłuż przekątnej komory Fuchsa-Rosenthala, przyjmując następujące zakresy liczebności: < 10; 10-100; > 100 osobników (7). Liczebność dużych wiciowców, korzenionózek, orzęsków i tkankowców ustalano w 4 preparatach mikroskopowych o pojemności 0,01 ml każdy i następnie przeliczano na 1 mg suchej masy osadu.

Identyfikację mikroorganizmów nitkowatych przeprowadzano zgodnie z metodyką Jenkinsa i in. (1) w materiale żywym oraz w preparatach barwionych metodami Grama i Neissera, testem S i testem PHB. Szacunkową liczebność organizmów nitkowatych przedstawiano w 6-stopniowej skali Jenkinsa. Dodatkowo określano strukturę oraz wymiary kłaczek w 30 losowo wybranych obrazach mikroskopowych.

3. Wyniki badań

3.1. Skład taksonomiczny i ilościowy mikrofauny osadu czynnego

Skład mikrofauny osadu czynnego przedstawiono w tabeli 2. Łącznie zidentyfikowano 17 taksonów, w tym 14 orzęsków, 2 wiciowce oraz korzenionózki bezdomkowe. Obecności korzenionózek domkowych i wrotków nie stwierdzono.

Tabela 2

Skład protozoa i mikroorganizmów nitkowatych w osadzie czynnym

Mikroorganizmy	Etapy badań					
	I		II		III	
	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7
Protozoa:						
<i>Zooflagellata</i> < 20 µm		< 10		10-100		10-100
<i>Trigonomonas</i> sp.	1500	280-4830	—	—	—	—
<i>Gymnamoeba</i> < 80 µm	600	310-840	4360	2260-9160	3130	610-6280
<i>Acineria uncinata</i>	—	—	2660	720-7780	2920	650-5900
<i>Tokopbrya</i> sp.	—	—	130	40-320	120	100-140
<i>Cbilodonella uncinata</i>	—	—	1510	270-2720	610	100-1180
<i>Drepanomonas revoluta</i>	1940	930-2940	12 880	2670-23 540	110	30-200
<i>Opercularia coarctata</i>	60	0-110	300	0-580	530	200-990
<i>Opercularia phryganeae</i>	—	—	220	0-630	30	0-100
<i>Opercularia</i> sp.	30	0-100	220	0-720	530	480-610
<i>Epistylis chrysemydis</i>	—	—	250	0-860	—	—
<i>Epistylis</i> sp.	130	0-270	240	0-470	90	0-150
<i>Vorticella infusioformis</i>	750	350-1370	240	0-490	630	150-880
<i>Vorticella convallaria</i>	100	0-430	620	60-1810	1210	150-2530
<i>Vorticella</i> sp.	—	—	210	0-520	440	200-710
<i>Aspidisca cicada</i>	7900	5570-11 230	3390	960-5440	3830	1250-5400
Liczba taksonów		7-10		10-14		12-14
Liczebność ogółem	13 010	9490-16 630	27 230	16 570-34 320	14 180	6250-22 600
Mikroorganizmy nitkowane						
Typ 1701		0-2		1-3		2-3
Typ 0092		0-2		—		—
Typ 1863		—		1-2		0-1
Typ 0041		—		1-2		1-2
Typ 0675		0-2		0-1		—
Typ 0411		—		0-2		0-2
Typ 1851		—		0-4		2-4
<i>Microthrix parvicella</i>		1-2		2-4		3-4
<i>Nostocoida limicola</i> II		0-1		1-2		2
<i>Thiotrix</i> I		0-1		—		—

1	2	3	4	5	6	7
<i>Sphaerotilus natans</i>		0-2		0-1		–
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>		–		3		3
<i>Streptococcus</i> sp.		2		2-3		3
Szacunkowa liczebność w skali Jenkinsa		1-2		2-4		3-4

a – średnia liczebność osob. mg^{-1}smo , b – zakres liczebności, 0 – brak, 1 – sporadycznie, 2 – nielicznie, 3 – dość licznie, 4 – licznie.

W marcu i kwietniu, tj. w okresie ograniczonej aeracji (etap I) liczba taksonów zmieniała się od 7 do 9 (w tym 4 do 7 orzęsków), a średnia liczebność ogółem wyniosła ok. 13 000 osob. $\cdot \text{mg}^{-1} \text{smo}$.

Największy udział w zbiorowisku miały w tym czasie orzęski *Aspidisca cicada*, *Drepanomonas revoluta* i *Vorticella infusionum*. Średni ich udział wyniósł odpowiednio 61, 15 i 6%. Charakterystyczny dla tego okresu był ponadto wysoki udział spropelowych wiciowców *Trigonomonas* (2-36%, średnio 11%) oraz niewielka liczebność małych wiciowców (< 10 osobników wzdłuż przekątnej komory Fuchsa-Rosenthala) i korzenionózek. Liczebność *Trigonomonas* wzrastała odpowiednio do stężenia ścieków.

Po zwiększeniu aeracji, nastąpił nagły wzrost liczebności zwierząt do ok. 98 000 osob. $\cdot \text{mg}^{-1}\text{smo}$, z czego 90% stanowiły korzenionózki bezdomkowe. Po tygodniu liczebność korzenionózek dziesięciokrotnie zmalała, natomiast wzrosła liczebność orzęsków: w pierw bakteriożerców – zwłaszcza *Drepanomonas revoluta* – później drapieźników, przede wszystkim żywiącej się wiciowcami *Acineria uncinata*. W okresie intensywnego napowietrzania (etap II) mikrofauna charakteryzowała się większą różnorodnością gatunkową (10-14 taksonów, w tym 8-12 orzęsków) (tab. 2). Wysoka początkowo ogólna liczebność systematycznie malała i po miesiącu wynosiła około 16 000 osob. $\cdot \text{mg}^{-1} \text{smo}$. Wysoką dominację utrzymywała *Drepanomonas revoluta*, a towarzyszyły jej korzenionózki bezdomkowe oraz orzęski *Aspidisca cicada*, *Acineria uncinata* i *Chilodonella uncinata*. Średni udział tych taksonów wyniósł odpowiednio 47, 16, 12, 10 i 6%. Charakterystyczna dla tego okresu była ponadto znikoma liczebność *Vorticella infusionum* (poniżej 1%), brak wiciowców z rodzaju *Trigonomonas* oraz liczne drobne wiciowce (10-100 osobników wzdłuż przekątnej komory Fuchsa-Rosenthala), głównie z rodzaju *Petalomonas*.

Po ponownej zmianie aeracji (etap III) odnotowano silniejsze oscylacje liczebności zwierząt, ale amplituda wahań była mniejsza niż poprzednio. Jednocześnie nastąpił drastyczny spadek liczebności orzęsków pełzających – *Drepanomonas revoluta* i *Chilodonella uncinata* – oraz stopniowy wzrost liczebności orzęsków osiadłych z rodzajów *Opercularia* i *Vorticella*. Korzenionózki bezdomkowe ustąpiły po trzech tygodniach zmniejszonej turbulencji, natomiast małe wiciowce, *Acineria uncinata* oraz *Aspidisca cicada* zachowały wcześniejszą liczebność. W czerwcu żaden gatunek

nie osiągnął istotnej przewagi. Udział dominantów, którymi były *Aspidisca cicada*, korzenionózki bezdomkowe, *Acineria uncinata* i *Vorticella convallaria* wyniósł odpowiednio 27, 22, 21 i 9%. Wiciowce z rodzaju *Trigonomonas* nie pojawiły się.

3.2. Skład mikroorganizmów nitkowatych i struktura kłaczków osadu czynnego

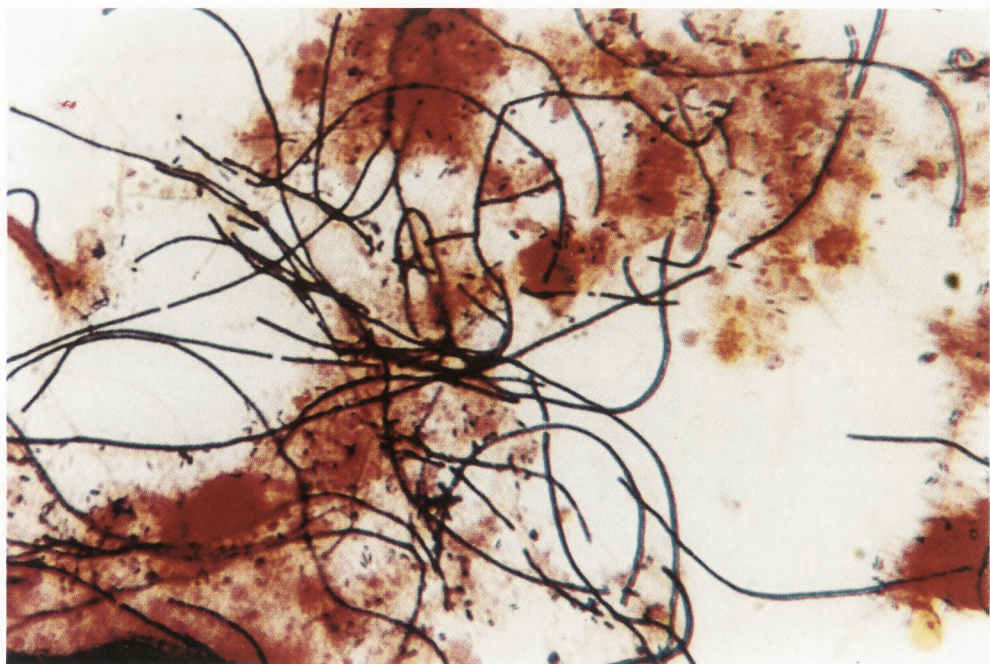
W ciągu czterech miesięcy obserwacji zidentyfikowano łącznie 13 typów morfologicznych mikroorganizmów nitkowatych (tab. 2). W początkowym okresie osad czynny charakteryzował się niewielką różnorodnością (2-6 typów) i znikomą liczebnością mikroorganizmów nitkowatych (1-2 punkty w skali Jenkinsa) (rys. 1b). Po zwiększeniu aeracji w kolejnych dniach analiz zidentyfikowano od 6 do 9 różnych typów. Jednocześnie stopniowo wzrastała ich liczebność. Na przełomie maja i czerwca ogólną liczebność mikroorganizmów nitkowatych szacowano na 4 punkty, co oznacza od kilku do 20 nici w kłaczkach. Najliczniej rozmnożyły się *Microthrix parvicella* (fot. 1,2) i Typ 1851 (fot. 3,4) (dominanty), tworzące charakterystyczne wiązki częściowo nie związane z kłaczkami. Typy te dominowały również w pianie. Dość licznie występowały *Streptococcus* sp. (fot. 5), *Haliscomenobacter hydrossis* (fot. 6) i Typ 1701 (fot. 7) (subdominanty).

Po zmniejszeniu turbulencji ogólna liczebność mikroorganizmów nitkowatych zmalała do 3 punktów w skali Jenkinsa, tj. do kilku nici w kłaczkach. W tym czasie w komorze aeracji wzrosła wyraźnie grubość piany, zawierającej głównie *M. parvicella* i Typ 1851. Po tygodniu liczebność obu szczepów w osadzie czynnym zwiększyła się ponownie, ale Typ 1851 zaczął tracić charakterystyczną, Gram dodatnią granulację i w końcu czerwca prawie wyginął. Liczebność pozostałych bakterii utrzymała się na niezmiennym poziomie do końca badań.

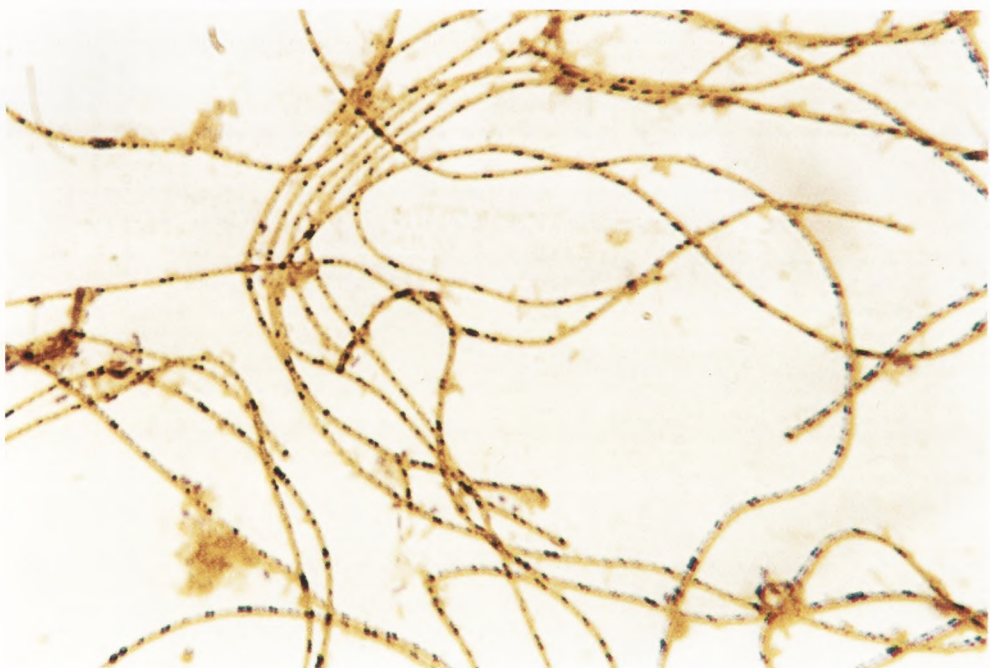
W ciągu całego okresu badań kłaczków osadu były drobne. Wielkość kłaczków zmieniała się od 30 do 250 μm (średnio ok. 130 μm), niezależnie od intensywności aeracji. W okresie licznego wzrostu mikroorganizmów nitkowatych kłaczków były powiązane nićmi w większe, luźne aglomeraty o nieregularnym kształcie i siatkowatej strukturze.

4. Dyskusja

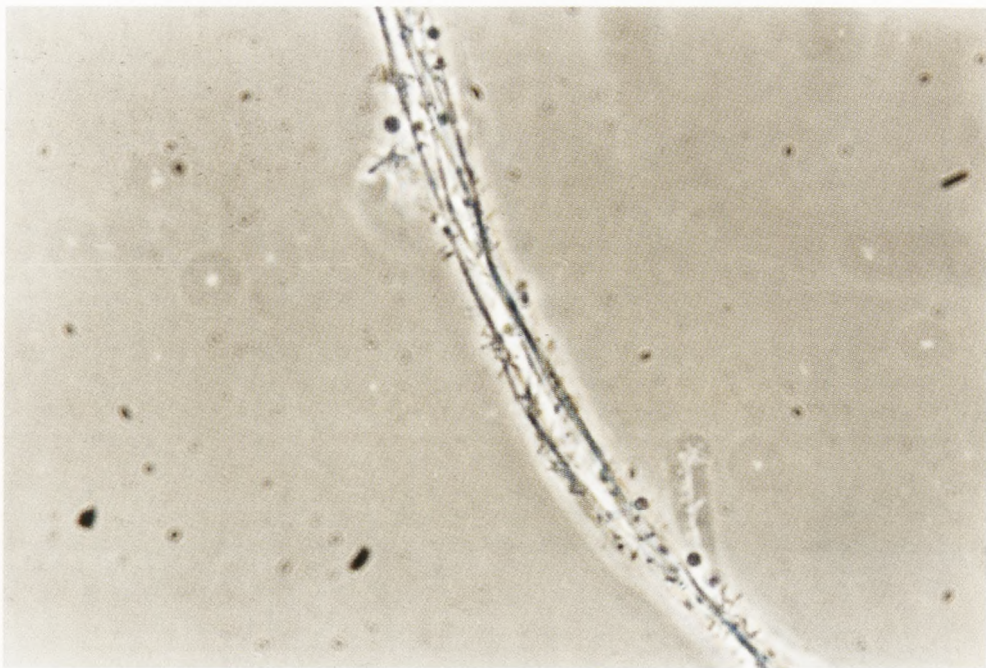
Wydajność oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego zależy od sprawnego przebiegu dwóch procesów: usuwania zanieczyszczeń w komorze aeracji oraz sedymentacji osadu w osadniku wtórnym. W oczyszczalniach ścieków bytowo-gospodarczych efektywność obydwu procesów kształtują w większości te same czynniki. Obok ładunku związków organicznych i wieku osadu główne znaczenie ma odpowiednio napowietrzanie i mieszanie ścieków z osadem czynnym w komorze reakcji. Niedostateczna turbulencja w komorach aeracji sprawia bowiem, że część osadu



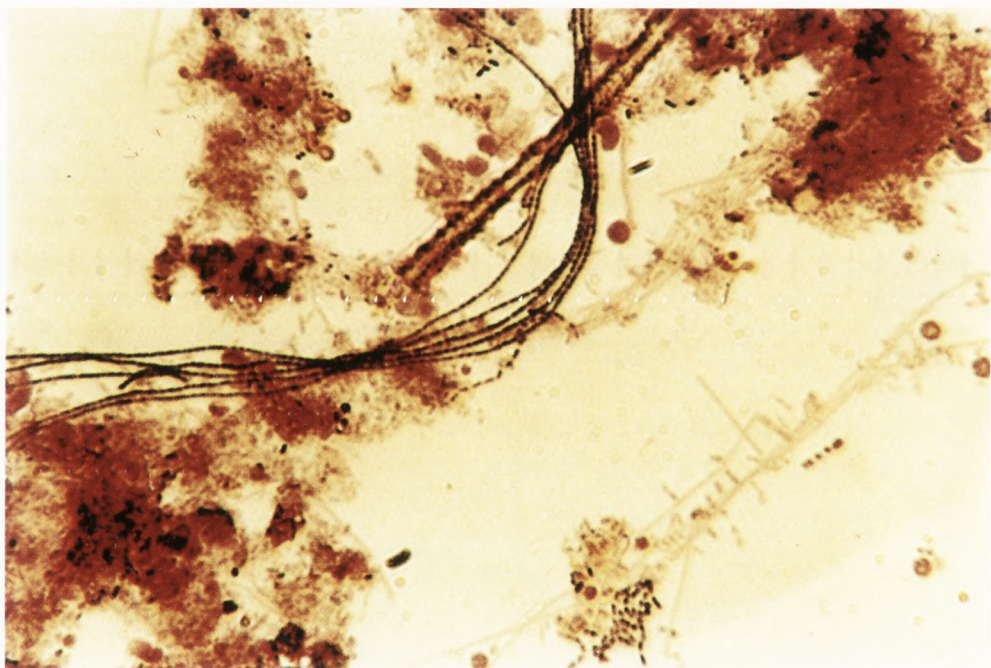
Fot. 1. *Microthrix parvicella* – Gram (+), powiększenie 1000×.



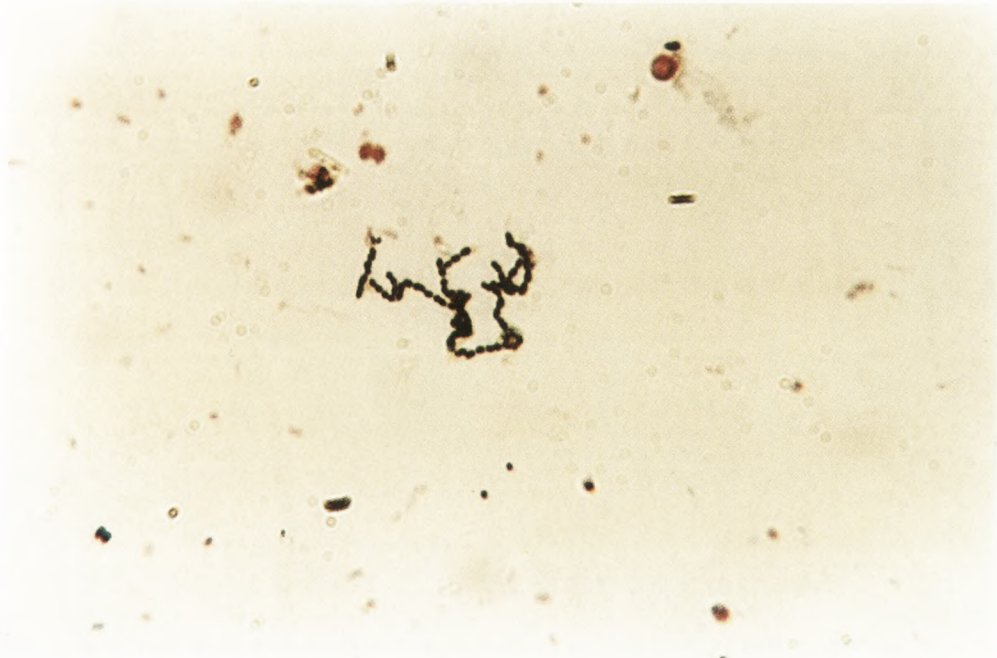
Fot. 2. *Microthrix parvicella* – Neisser (granule +), powiększenie 1000×.



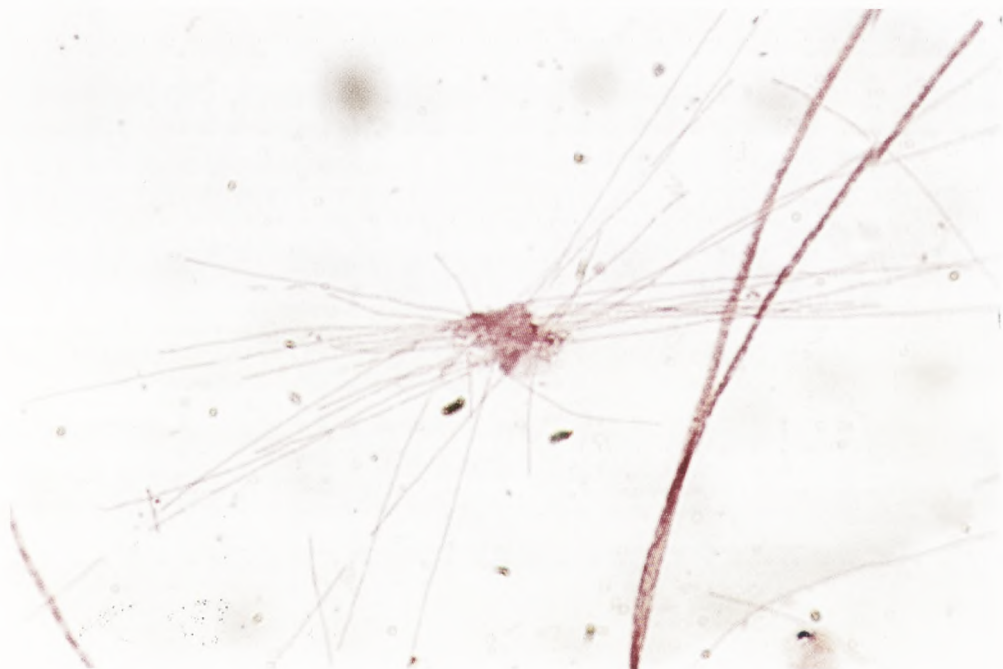
Fot. 3. Typ 1851 – kontrast fazowy, powiększenie 1000 \times .



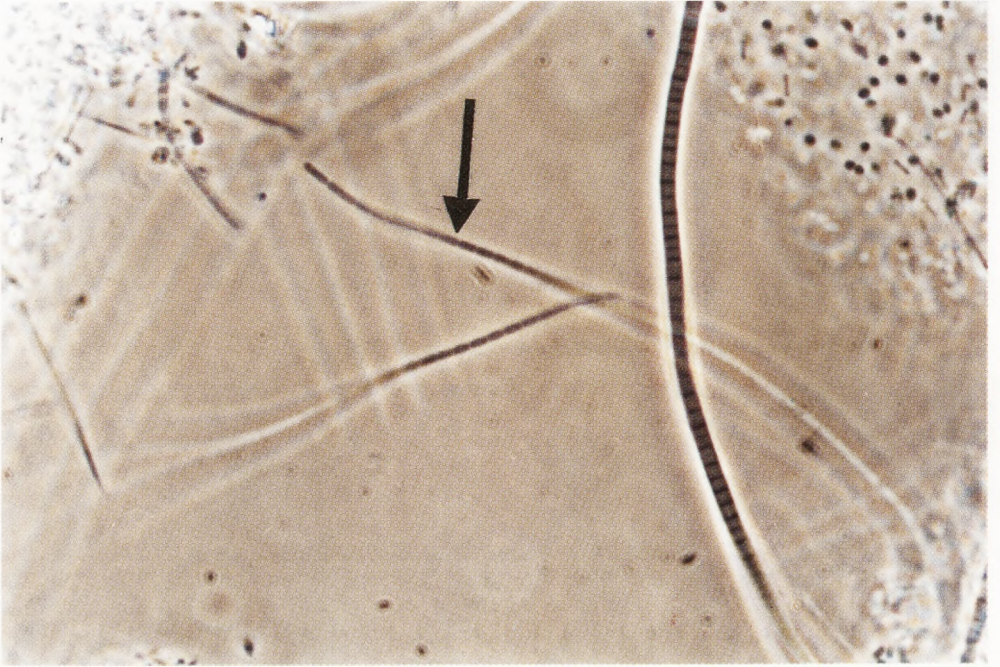
Fot. 4. Typ 1851 – Gram (+), powiększenie 1000 \times .



Fot. 5. *Streptococcus* sp. – Gram (+), powiększenie 1000×.



Fot. 6. *Haliscomenobacter hydrossis* – Gram (-), powiększenie 1000×.



Fot. 7. Typ 1701 ↓ oraz Thiobacillus I – kontrast fazowy, powiększenie 1000×.

czynnego jest niedotleniona lub przeciążona, co uniemożliwia mineralizację ścieków, a czasem powoduje puchnięcie osadu (8,9). Zbyt silna turbulencja jest również niepożądana. Przetleniony osad czynny nie wykazuje większej sprawności oczyszczania, natomiast może ulegać rozdrobnieniu i/lub rozwarstwiać się w osadniku wtórnym na skutek denitryfikacji (10). W konsekwencji wzrasta mętność odpływu i flotujący osad czynny zakłóca funkcje wielu urządzeń służących oczyszczaniu ścieków i przeróbce osadów. Nadmierna turbulencja jest szczególnie niekorzystna w nisko obciążonych systemach wyposażonych w mechaniczne aeratory powierzchniowe, które z reguły produkują osad o małej gęstości (11).

Analiza zebranych informacji oraz wyniki własnych badań pozwalają sądzić, że problemy eksploatacyjne oczyszczalni ścieków w Olsztynie wynikają z niedopasowania urządzeń napowietrzających do rzeczywistych warunków oczyszczania. Dotyczy to szczególnie zimowej i wiosennej pory roku, kiedy dopływ wód z komór fermentacji osadów ściekowych zwiększa o co najmniej 30-50% ładunek zanieczyszczeń. Zaprojektowana moc aeratorów, stwarzająca warunki dobrej sedymentacji osadu czynnego, nie gwarantuje wówczas uzyskania normatywnej jakości odpływu. Niska sprawność usuwania CHZT (72-75%) i brak nitryfikacji sygnalizują niedobór tlenu. Świadczy o tym również mała różnorodność gatunkowa orzęsków, brak orzęsków drapieżnych i wrotków, wysoka dominacja tolerancyjnej *Aspidisca cicada* oraz znaczny udział *Vorticella infusionum* – wskaźnika zespołu przeciążenia (4,12). Beztlenowe wiciowce z rodzaju *Trigonomonas* sygnalizują raczej dopływ wód z komór fermentacji, bowiem ich naturalnym siedliskiem są gnijące osady organiczne (5).

Wobec licznych dowodów niedoboru tlenu wyniki pomiarów sondą tlenową są raczej, jak się wydaje, nieco zawyżone. Stężenie tlenu rozpuszczonego w zakresie od 1 do 2 mg · dm⁻³ jest bowiem uważane za wystarczające dla biodegradacji związków organicznych, a 2 mg · dm⁻³ – nawet dla nitryfikacji (13).

Pośrednim dowodem deficytu tlenu są też zmiany jakie wystąpiły po spiętrzeniu ścieków w komorze: poprawa o ok. 10% sprawności usuwania ChZT (80-89%) oraz prawie dwukrotny wzrost różnorodności zbiorowisk orzęsków (8-12 taksonów). Silna turbulencja zakłóciła jednak stan równowagi pomiędzy tempem rozmnażania bakterii a flokulacją. Wskazuje na to dynamiczny wzrost liczebności pierwotniaków odżywiających się bakteriami zdyspergowanymi, w tym wiciowców i korzenionózek bezdomkowych – uznanych wskaźników wszelkich zakłóceń. Powrót do równowagi trwał – sądząc po malejącej liczebności bakteriożerców – co najmniej 4 tygodnie. Innym negatywnym, a przy tym trwałym skutkiem zwiększenia aeracji było sukcesywne pogarszanie się właściwości sedymentacyjnych osadu czynnego – w ciągu miesiąca indeks objętościowy osadu wzrósł z 73 do 441 ml · g⁻¹.

Podobne zmiany w osadzie czynnym po zwiększeniu intensywności napowietrzania obserwowała Kalisz (14). Wzrostowi stężenia tlenu rozpuszczonego z 2,21 do 4,21 mg · dm⁻³ towarzyszył trzykrotny wzrost ogólnej liczebności bakterii oraz blisko dwukrotny wzrost udziału orzęsków. Autorka stwierdziła lepszą o 4% spraw-

ność usuwania BZT₅, ale jednocześnie większe rozdrobnienie kłaczków i zwiększoną liczebność bakterii nitkowatych, których bliżej nie identyfikowała; indeks osadu wzrósł z 89 do 204 ml · g⁻¹.

W oczyszczalni olsztyńskiej pogorszenie sedimentacji osadu czynnego nastąpiło prawdopodobnie z dwóch powodów: wzrostu lekkości kłaczków na skutek przywierania do nich pęcherzyków powietrza, co jest często obserwowane w reaktorach wyposażonych w aeratory powierzchniowe, oraz rozwoju mikroorganizmów nitkowatych. Na dwojaki mechanizm zakłóceń sedimentacji wskazuje pośrednio spadek indeksu z 441 do ok. 220 ml · g⁻¹, jaki nastąpił po ponownym zmniejszeniu aeracji, przy mało zmienionej liczbie nici. Ponadto, występujące w niniejszym osadzie typy – *Microthrix parvicella*, Typ 1851, *Haliscomenobacter hydrossis* i Typ 1701 – na ogół nie zwiększają indeksu objętościowego powyżej 200-300 ml · g⁻¹ (15).

Te szeroko rozpowszechnione w świecie mikroorganizmy osadu czynnego są – z wyjątkiem Typu 1701 – wskaźnikami niskiego obciążenia (0,05-0,25 kg BZT₅ kg⁻¹ smo) i długiego wieku osadu czynnego (powyżej 10 dni), co wiąże się z małą, swoistą szybkością wzrostu oraz odpornością na głodowanie (16). W czystych kulturach *M. parvicella* osiąga μ_{\max} od 0,3 d⁻¹ do 1,4 d⁻¹, a *H. hydrossis* 1,2-2,2 d⁻¹ (15).

Typ 1701 jest uznanym wskaźnikiem niskiego natlenienia osadu czynnego, a dokładniej niedotlenienia wnętrza kłaczków. Współczynnik K_O, oznaczający stężenie tlenu, przy którym bakteria osiąga połowę maksymalnej szybkości wzrostu, wynosi w hodowli zaledwie 0,014 mg · dm⁻³ (17). Dla porównania K_O dla bakterii izolowanych z kłaczków osadu wynosi 0,07 mg · dm⁻³. Typ 1701 w hodowli wzrasta z szybkością $\mu_{\max} = 2,6$ d⁻¹ i jest na ogół mało zależny od wieku osadu.

Wyjaśnienie dlaczego mikroorganizmy nitkowane rozmnażały się podczas intensywnego napowietrzania osadu czynnego, a prawie nie występowały w warunkach zmniejszonej aeracji ma podstawowe znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania oczyszczalni olsztyńskiej. Czynnikiem kontrolującym ich wzrost nie było zapewne obciążenie osadu ładunkiem BZT₅, które w całym okresie badań utrzymywało się na podobnym poziomie, średnio 0,20-0,23 kg kg⁻¹smo d, tj. na granicy zakresu optymalnego dla mikroorganizmów niskiego obciążenia. Trudno też uznać, aby stężenie tlenu rozpuszczonego oraz produkty fermentacji były w tym przypadku czynnikiem ograniczającym. Powinowactwem do tlenu w niskich stężeniach charakteryzuje się nie tylko Typ 1701, ale również *M. parvicella* i *H. hydrossis* (16). Ponadto dwa pierwsze typy syntetyzują związki zapasowe korzystając właśnie z produktów fermentacji.

Przyczyną sprzecznego z pozoru zachowania Typu 1701 była zapewne wzmoczone – na skutek większego dostępu tlenu – aktywność metaboliczna bakterii tworzących kłaczkę, prowadząca do większego odtlenienia centralnej strefy kłaczków. Małe wymagania tlenowe Typu 1701 dają mu przewagę w konkurencji z innymi bakteriami tworzącymi kłaczek. Typ 1701 może występować masowo w wysoko wydajnym osadzie czynnym nawet przy stężeniu 10 mg · dm⁻³ tlenu rozpuszczonego (15).

Najbardziej prawdopodobną przyczyną puchnięcia osadu czynnego w konwencjonalnej oczyszczalni olsztyńskiej przez mikroorganizmy nitkowane niskiego ob-

ciążenia jest sama turbulencja. Podczas intensywnej aeracji następuje wypienianie się części osadu czynnego wraz z mikroorganizmami nitkowatymi. W pianie dokonuje się selekcja metaboliczna szczepów tolerujących warunki anoksyczne bądź beztlenowe (18). Szczególne znaczenie w tym przypadku mają mikroorganizmy hydrofobowe – *Microthrix parvicella*, *Nocardia* spp., które wykazują tendencję do flotowania i utrwalają strukturę piany. Zatrzymująca się na obrzeżach komór aeracji niewielka piana powiększa stopniowo swoją objętość i w końcu trafia do osadników wtórnych, a ponieważ nie jest usuwana poza układ, wraca do komór aeracji wraz z recyrkulatem oraz ze ściekami z komór fermentacji, do których doprowadzany jest osad nadmierny. Westlund i in. (19) podają, że *Microthrix parvicella* dobrze znosi warunki w komorze fermentacji i może powodować tam ostre pienienie. W ten sposób piana, której czas retencji jest znacznie dłuższy niż wiek osadu czynnego (15), staje się potencjalnym miejscem rozmnażania się mikroorganizmów nitkowatych długiego wieku.

Foot i in. (18) stawiają istotne pytanie: *Do filaments cause foam or does foam cause filaments?* Jeżeli druga część pytania jest prawdziwa, to istnieje uzasadniony powód, aby przeciwdziałać tworzeniu się piany we wczesnym stadium jej powstawania oraz może wyjaśniać dlaczego spryskiwanie wodą wyróżnia się tak wysoką skutecznością w kontrolowaniu piany. W USA efektywność tej metody sięga 88% (20). Zmniejszanie aeracji w celu przeciwdziałania pienieniu, a tym samym wzrostowi mikroorganizmów hydrofobowych, daje efekt w 60% zastosowań.

Ograniczanie burzliwości środowiska jako metoda poprawy sedymentacji osadu czynnego zostało z dobrym skutkiem wypracowane w oczyszczalni ścieków w Olsztynie. Ze względu na ryzyko niedotlenienia osadu z jednej strony i puchnięcia z drugiej, sterowanie napowietrzaniem powinno być prowadzone pod kontrolą obejmującą również mikroskopowe obserwacje osadu czynnego. Zauważalny wzrost liczebności *Microthrix parvicella* będzie sygnałem do podjęcia działań zapobiegających utrwalaniu się piany. Przeoczenie tego momentu grozi lawinowym wzrostem *M. parvicella* oraz trudnym do zlikwidowania pienieniem i puchnięciem osadu czynnego. Często praktykowane w takiej sytuacji wydłużanie czasu zatrzymania w osadnikach wtórnych może – jak wskazują Hagland i in. (21) – jedynie przyspieszyć ten proces.

5. Wnioski

a. W osadzie czynnym oczyszczającym ścieki miejskie Olsztyna zidentyfikowano w porze wiosennej 13 typów morfologicznych mikroorganizmów nitkowatych – w większości wskaźników niskiego obciążenia osadu ładunkiem organicznym.

b. Różnorodność typów oraz liczebność mikroorganizmów nitkowatych zależała wprost od intensywności napowietrzania. Liczba typów wzrastała od 2-6 przy słabej aeracji do 6-9 przy intensywnej. Ogólna liczebność mikroorganizmów nitkowatych

zmieniała się odpowiednio od 1-2 do 4 punktów w szacunkowej skali Jenkinsa (od nielicznych w preparacie do kilkunastu nici w każdym kłaczkcu).

c. Największą liczebność osiągnęły: *Microthrix parvicella*, Typ 1851 oraz *Haliscomenobacter hydrossis* i Typ 1701. Wzrostowi liczebności dominantów towarzyszyło pienienie i puchnięcie osadu czynnego.

d. Uznano, że pierwotnym miejscem rozmnażania się mikroorganizmów nitkowatych niskiego obciążenia w konwencjonalnym osadzie czynnym jest prawdopodobnie piana, której powstawaniu sprzyja nadmierna turbulencja, a utrwalaniu – hydrofobowe właściwości *Microthrix parvicella*.

e. W badaniach potwierdzono korzystny wpływ intensywnego napowietrzania osadu czynnego na sprawność usuwania zanieczyszczeń i strukturę mikrofauny oraz negatywny wpływ na fizyczne właściwości osadu. Wzrostowi stężenia tlenu rozpuszczonego z 1-2 mg · dm⁻³ do 3,0-3,3 mg · dm⁻³ towarzyszyła większa o 10% wydajność usuwania ChZT, dwukrotnie większa różnorodność gatunkowa orzęsków, ale jednocześnie wzrost indeksu objętościowego z 73 do 441 ml g⁻¹. Oprócz puchnięcia nitkowatego przyczyną zaburzeń sedymentacji było silne wysycenie kłaczków pęcherzykami powietrza, będące również konsekwencją nadmiernej turbulencji.

Literatura

1. Jenkins D., Richard M. G., Daigger G. T., (1986), *Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming*, Water Research Commission, Pretoria, RPA.
2. Richard M. G., (1989), *Activated sludge microbiology*, The Water Pollution Control Federation., Alexandria, Virginia.
3. Wanner J., (1994), *Wat. Sci. Tech.*, 29, 193-202.
4. Foissner W., Berger H., (1996), *Freshwater Biology*, 35, 375-482.
5. Cyrus Z., Sladeček V., (1973), *A guide of organisms from waste water plants*, Prace a studie, 133, Vyz. Ustav Vodohosp., Praha.
6. Sladka A. Sladeček V., (1985), *A guide of organisms from waste water plants*, Prace a studie, 162, Vyz. Ustav Vodohosp., Praha.
7. Madoni P., (1994), *Wat. Res.*, 28, 67-75.
8. Sezgin M., Jenkins D., Parker D. S., (1978), *JWPCF*, 50, 362-381.
9. Palm J. C., Jenkins D., (1980), *JWPCF*, 52, 2484-2506.
10. Gray N. F., (1989), *Biology of wastewater treatment*, Oxford Univ. Press, Oxford.
11. Konicek Z., Burdych J., (1998), *Wat. Sci. Tech.*, 20, 153-163.
12. Madoni P., (1991), *Role of protozoans and their indicator value in the activated sludge process*, in: *Biological approach to sewage treatment process: Current status and perspectives*, Ed. P. Madoni, Perugia, Centro Bazzucchi, 21-27.
13. Hawkes H. A., (1983), *Activated sludge*, in: *Ecological aspects of used-water treatment. Vol. 2 – Biological activities and treatment processes*, Eds. C. R. Curds, H. A. Hawkes, Academic Press, London.
14. Kalisz L., (1971), *Gaz, Woda*, 11, 391-394.
15. Wanner J. (1994a), *Activated sludge bulking and foaming control*, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster.
16. Jenkins D., (1992), *Wat. Sci. Tech.*, 25, 215-230.
17. Richard M. G., Hao O. P., Jenkins D., (1985), *JWPCF*, 57, 68-81.

18. Foot R. J., Robinson M. S. Forster, C. F., (1994), *Wat. Sci. Tech.*, 29, 213-220.
19. Westlund A. D., Hagland E., Rothman M., (1998), *Wat. Sci. Tech.*, 37, 51-55.
20. Pitt P., Jenkins D., (1990), *Res. J. Water Pollut. Control Fed.*, 62, 143-150.
21. Hagland E., Westlund A. D., Rothman M., (1998), *Wat. Sci. Tech.*, 37, 47-50.