Małgorzata MIĄSIK¹
Joanna CZARNOTA²
Janusz A. TOMASZEK³

EMISJA GAZÓW CIEPLARNIANYCH Z OBIEKTÓW OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW

Gazy cieplarniane, głównie metan (CH_4), dwutlenek węgla (CO_2) i podtlenek azotu (N_2O) występują w atmosferze, w warunkach naturalnych, w stężeniach od ppb do ppm. Zwiększenie emisji tych gazów ze źródeł antropogenicznych powoduje wzrost ich stężenia, narastający w czasie i wpływający na zmianę klimatu. Gazy te mogą być produkowane w procesach oczyszczania ścieków. Ich efekt cieplarniany jest wyrażany wartością wskaźnika globalnego potencjału cieplarnianego. W oparciu o przegląd literatury, scharakteryzowano główne gazy cieplarniane powstające w ciągu technologicznym oczyszczalni ścieków, jak również dokonano rozpoznania czynników, które wpływają na ich emisję. Określono udział różnych sektorów (np. rolnictwa, przemysłu zaopatrzenia w energię itp.) w całkowitej antropogenicznej emisji GHG. Omówiono główne źródła emisji GHG z obiektów oczyszczalni ścieków i procesy, w których są wytwarzane. Szczególną uwagę zwrócono na procesy generujące CO_2 i CH_4 w aerobowych i anaerobowych warunkach. Dokonano analizy biochemicznych przemian związków azotu w tym nityfikacji i denityfikacji w aspekcie wytwarzania podtlenku azotu. Zwrócono uwagę na typowo szacunkowe bilansowanie źródeł emisji GHG w oparciu o przyjęte kryteria czy współczynniki standardów oraz wskazano na dotkliwy brak badań, a w szczególności pomiarów *in situ*.

Słowa kluczowe: gazy cieplarniane, globalny potencjał cieplarniany (GWP), oczyszczanie ścieków, procesy tlenowe i beztlenowe

1. Wstęp

Ochrona środowiska naturalnego jest od wielu lat jednym z najważniejszych obszarów współpracy państw członkowskich Unii Europejskiej. Wstą-

¹ Autor do korespondencji: Małgorzata Miąsik, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 19 64, msutyla@prz.edu.pl

² Joanna Czarnota, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 19 64, askalucz@prz.edu.pl

³ Janusz A. Tomaszek, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 13 61, tomaszek@prz.edu.pl

pienie Polski do UE narzuciło liczne zobowiązania dotyczące standardów w ochronie środowiska, a problematyką tą objęto następujące elementy środowiska: stan czystości i ochronę wód, ochronę powietrza atmosferycznego i klimatu, ochronę przyrody i bioróżnorodności, gospodarkę odpadami, zanieczyszczenie substancjami promieniotwórczymi i hałasem, ocenę stanu degradacji środowiska oraz ekonomiczne aspekty ochrony środowiska [24].

Rozwój wysokosprawnych technologii oczyszczania ścieków oraz realizacja założeń Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych [23] pozwalają na zmniejszenie wpływu ścieków na środowisko wodne. Jednak technologie oczyszczania ścieków, które zapewniają usuwanie związków organicznych oraz substancji biogenych, przyczyniają się do emisji gazów cieplarnianych (GHG), głównie: dwutlenku węgla (CO_2), metanu (CH_4) i podtlenku azotu (N_2O) [8, 24]. Globalna koncentracja atmosferyczna tych gazów znacząco wzrosła od 1750 roku w efekcie działalności ludzkiej i obecnie znacznie przewyższa wartości przed epoką przemysłową [11]. Ograniczenie emisji GHG z procesów oczyszczania ścieków oraz określenie jej „udziału” w globalnym ociepleniu jest poważnym problemem [8]. Tak więc istotnym staje się szczegółowe rozpoznanie wszystkich źródeł emisji GHG.

W pracy, w oparciu o przegląd literatury, scharakteryzowano główne gazy cieplarniane powstające w ciągu technologicznym oczyszczalni ścieków oraz dokonano również rozpoznania czynników, które wpływają na ich emisję.

2. Gazy cieplarniane – emisja z oczyszczalni ścieków

2.1. Globalny potencjał cieplarniany

Gazy cieplarniane, głównie metan, dwutlenek węgla i podtlenek azotu występują w atmosferze, w warunkach naturalnych, w stężeniach od ppb do ppm. Zwiększenie emisji tych gazów ze źródeł antropogenicznych powoduje wzrost ich stężenia, narastający w czasie i wpływający na zmianę klimatu [21]. Według danych Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) trwająca emisja GHG na dotychczasowym lub wyższym poziomie będzie powodowała dalsze ocieplenie i będzie generowała wiele zmian w globalnym systemie klimatycznym w XXI wieku. Do źródeł emisji powodowanych działalnością człowieka zalicza się m.in.: spalanie paliw kopalnych, produkcję cementu i innych substancji z węglanów, użytkowanie łąd (szczególnie wylesianie), rolnictwo oraz sektor związany z gospodarką odpadami i ściekami (rys. 1) [14]. Biodegradacja materii organicznej zawartej w ściekach jest uważana za jedno z antropogenicznych źródeł emisji gazów cieplarnianych [31].

Rys. 1. Udział różnych sektorów w całkowitej antropogenicznej emisji GHG w roku 2004 wyrażony w ekwiwalencie CO₂ (w leśnictwie ujęto wylesianie), na podstawie [14]

Fig. 1. Contribution of subsequent sectors in the total anthropogenic GHG emissions in 2004, expressed in CO₂ equivalent (forestry included deforestation)

Podczas eksploatacji oczyszczalni ścieków powstają m.in. dwutlenek węgla (CO₂), metan (CH₄) oraz podtlenek azotu (N₂O). W celu ilościowej oceny wpływu poszczególnych gazów na efekt cieplarniany, odniesiony do dwutlenku węgla, w przyjętym horyzoncie czasowym (zazwyczaj 100 lat) wprowadzono wskaźnik globalnego potencjału cieplarnianego (GWP – *ang. Global Warming Potential*). Określa on zdolność danego gazu cieplarnianego do zatrzymywania ciepła w atmosferze w odniesieniu do dwutlenku węgla (Tabela 1) [8, 12].

Tabela 1. Wartości wskaźnika GWP dla GHG powstających w oczyszczalni ścieków [13]

Table 1. The GWP of GHGs produced in Wastewater Treatment Plants

Gaz cieplarniany	Wzór chemiczny	GWP
Dwutlenek węgla	CO ₂	1
Metan	CH ₄	25
Podtlenek azotu	N ₂ O	298

Jak pokazano w tabeli 1 GWP znacznie się różni, w zależności od rodzaju gazu. Ta sama masa CH₄ powoduje 25-krotnie większy efekt cieplarniany niż CO₂ (1 kg wyemitowanego CH₄ ma taki sam potencjał jak 25 kg wyemitowanego CO₂), natomiast taka sama masa N₂O powoduje aż 298-krotnie większy efekt cieplarniany niż CO₂ [2, 21, 27].

Polityka Klimatyczna Polski z 2003 r., w której określono strategię redukcji emisji gazów cieplarnianych w Polsce do 2020 r., jako główny cel dla polityki związanej z gospodarką ściekami zakłada ograniczenie emisji GHG w oczyszczalniach ścieków poprzez:

- instalacje technologii ujęć biogazu i jego utylizacji,
- wdrażanie biologicznych procesów oczyszczania w oparciu o najlepsze dostępne technologie,
- obniżenie energochłonności procesu oczyszczania,
- doprowadzenie do samowystarczalności energetycznej oczyszczalni przez wykorzystanie biogazu do produkcji energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu [23].

2.2. Główne źródła emisji GHG z obiektów oczyszczalni i procesy ich powstawania

Ścieki dopływające do oczyszczalni ścieków siecią kanalizacyjną, jak również dowożone taborem asenizacyjnym są poddawane procesom oczyszczania, które obejmują obróbkę mechaniczną oraz procesy biologicznego oczyszczania. Dodatkowo oczyszczalnie muszą być przystosowane do odpowiedniej obróbki odpadów powstających w ciągu technologicznym oczyszczania ścieków [28]. Procesy te, prowadzone zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych, przyczyniają się do emisji GHG. Emisje te pochodzą m.in. z trzech różnych źródeł – zużycia energii na różnych etapach oczyszczania, deponowania osadu na placach oraz uwalniania biogazu do atmosfery w wyniku fermentacji beztlenowej osadu [21]. Schemat emisji gazów cieplarnianych z procesów oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych przedstawiono na rys. 2.

Emisja CO₂ z oczyszczalni ścieków może być oszacowana na podstawie zapotrzebowania obiektu w energię. Metan jest przeważnie emitowany z sieci kanalizacyjnej oraz w wyniku procesów, których celem jest obróbka i unieszkodliwianie osadów ściekowych [16]. Wielkość emisji CH₄ z oczyszczalni ścieków szacowana jest na około 5% w stosunku do globalnej emisji tego gazu ze wszystkich źródeł (antropogenicznych i naturalnych) [6]. Przypuszcza się, że globalna emisja metanu ze ścieków może wzrosnąć o około 20% między rokiem 2005, a 2020 [8]. Emisja N₂O ze ścieków wynika z działalności mikroorganizmów w procesach nitryfikacji i denitryfikacji [21]. Na podstawie dostępnych raportów oraz dotychczasowych badań, emisja podtlenku azotu ze ścieków oszacowana została na ok. 3% w stosunku do globalnej wielkości emisji tego gazu ze wszystkich źródeł. Według prognoz globalna emisja N₂O z obiektów oczyszczalni może wzrosnąć o około 13% między rokiem 2005, a 2020 [8]. Według Prendez i wsp. [21] emisje z biodegradacji substancji organicznych obecnych w ściekach stanowią ok. 0,18% całkowitej emisji ze źródeł antropogenicznych w każdym kraju.

Rys. 2. Schemat emisji GHG dla ścieków bytowo-gospodarczych, na podstawie [21]

Fig. 2. Scheme greenhouse gases emissions from domestic wastewater

W krajach rozwiniętych emisje GHG z obiektów oczyszczalni ścieków są zazwyczaj niższe, a wpływa na to odpowiednia infrastruktura oczyszczania ścieków. W krajach rozwijających się (wzrost liczby ludności, rozwój gospodarczy, wzrost urbanizacji), ale bez jednoczesnego rozwoju odpowiedniej infrastruktury ściekowej, emisje CH_4 i N_2O ze ścieków są na ogół wyższe niż w krajach rozwiniętych. Większość krajów nie prowadzi całkowitych rocznych statystyk powstających ścieków komunalnych oraz ścieków oczyszczanych. Szacuje się, że 60% światowej populacji ma dostęp do kanalizacji, z której ścieki odprowadzane są do obiektów oczyszczalni [13].

2.2.1. Związki węgla (CO_2 i CH_4)

Ditlenek węgla i metan w oczyszczalni ścieków wytwarzane są podczas procesów oczyszczania, w wyniku zużycia energii elektrycznej na różnych etapach oczyszczania oraz poprzez uwalnianie biogazu do atmosfery [8, 32]. Wpływ na wielkość emisji tych gazów ma zastosowana metoda oczyszczania ścieków (rys. 3) [18].

Podczas tlenowego oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, CO_2 jest produkowany w następstwie rozkładu materii organicznej [8] oraz w wyniku wytwarzania energii elektrycznej [32]. Tlenowe procesy oczyszczania wytwarzają ponad dwa razy większą ilość CO_2 aniżeli procesy beztlenowe [18]. Aerobowe systemy oczyszczania ścieków są energochłonne, a największe nakłady energii ponosi się na napowietrzanie osadu czynnego. Napowietrzanie ścieków stanowi od 45 do 75% wydatków na energię elektryczną w oczyszczal-

ni ścieków [5]. Ilość CO_2 wytworzonego w wyniku produkcji energii elektrycznej znacznie przewyższa ilość CO_2 powstałą w podczas samego procesu oczyszczania [18]. Do oszacowania emisji CO_2 związanych ze spalaniem biogazu zaproponowano współczynnik $0,104 \text{ kg CH}_4/\text{kg ChZT}$ usunięte w warunkach beztlenowych [25].

Tlenowy system oczyszczania ścieków:

Beztlenowy system oczyszczania ścieków:

Rys. 3 Procesy generujące CO_2 i CH_4 w tlenowych i beztlenowych systemach oczyszczania ścieków, na podstawie [31]

Fig. 3. CO_2 i CH_4 generating processes in aerobic and anaerobic biological treatment systems

Metan jest produkowany podczas beztlenowych procesów oczyszczania ścieków [8] oraz w komorach fermentacyjnych, w których osady ściekowe ulegają fermentacji beztlenowej [32], a wielkość jego emisji uzależniona jest przede wszystkim od zawartości w ściekach biodegradowalnej materii organicznej, temperatury i rodzaju zastosowanego systemu oczyszczania ścieków [8]. Fermentacja beztlenowa jest złożonym procesem polegającym na biochemicznym rozkładzie wielkocząsteczkowych związków organicznych zawartych w osadach ściekowych. Proces ten zachodzi w warunkach beztlenowych przy udziale różnych grup bakterii. Produktem końcowym procesu fermentacji beztlenowej

jest osad o zmniejszonej zawartości związków organicznych oraz biogaz [22]. Biogaz składa się zazwyczaj w 60% z CH_4 i 40% z CO_2 . Gaz ten może być wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej i ciepłej, dzięki czemu nie następuje uwalnianie gazów cieplarnianych do atmosfery [32]. Szacunkowa emisja CH_4 z oczyszczalni ścieków i przeróbki osadów w 2000 r. wynosiła ok. $30 \cdot 10^3 \text{ MgCH}_4/\text{rok}$, podczas gdy w roku 2003 ok. $8 \cdot 10^3 \text{ Mg CH}_4/\text{rok}$. Do tendencji spadkowej przyczynił się wzrost liczby oczyszczalni ścieków wyposażonych w zamknięte komory fermentacyjne (z ok. 46% do ok. 54%) oraz wzrost stopnia wykorzystania biogazu (z ok. 80% do ok. 98%) [33].

Energia ciepła jest niezbędna do utrzymania odpowiedniej temperatury w komorach fermentacyjnych, oraz w okresie zimowym do ogrzewania budynków technologicznych i socjalnych oczyszczalni ścieków [7, 30]. Energia elektryczna jest wymagana do pracy takich urządzeń jak np. sprężarki napędzane silnikami elektrycznymi, pompy zawracające i transportujące osad nadmierny oraz inne silniki napędzające urządzenia mechaniczne. Część tych potrzeb energetycznych może być zaspokojona przez zastosowanie systemu kogeneracji, który wykorzystuje biogaz do produkcji energii. Na oczyszczalni ścieków w Rzeszowie wykorzystanie biogazu w kogeneracyjnym systemie produkcji ciepła i energii elektrycznej zaspokoiło w 100% potrzeby cieplne oczyszczalni, a udział energii elektrycznej w stosunku do zakupionej wzrósł do 49% [30]. Natomiast system kogeneracji na oczyszczalni Portinho da Costa (Portugalia) obniżył zużycie gazu ziemnego i energii elektrycznej o 67%, co odpowiada zmniejszeniu emisji CO_2 o 39% [32].

2.2.2. Podtlenek azotu

Podtlenek azotu (N_2O), który może być emitowany w trakcie oczyszczania ścieków jest gazem o silnym potencjale cieplarnianym. Głównym źródłem emisji N_2O z obiektów oczyszczalni ścieków są procesy związane z biologicznym usuwaniem azotu: nitryfikacja i denitryfikacja (rys. 4) [10].

Nitryfikacja jest procesem utleniania amoniaku (NH_4^+) do azotanów (NO_3^-) przez azotyny (NO_2^-), który przebiega dwuetapowo [10]. W pierwszym etapie następuje utlenianie NH_4^+ do NO_2^- przez bakterie utleniające amoniak (AOB - *Ammonia Oxidizing Bacteria* lub nitrozobakterie), natomiast w drugim przemiana NO_2^- do NO_3^- przez bakterie utleniające azotyny (NOB - *Nitrite Oxidizing Bacteria*, nitrobakterie) [10, 19]. Podczas nitryfikacji, jako jeden z produktów pośrednich, powstaje N_2O . Prawdopodobne mechanizmy jego powstawania to:

- wytwarzanie przez niektóre bakterie nitryfikujące w wyniku redukcji NO_2^- w warunkach ograniczonego dostępu tlenu [10],
- utlenianie hydroksyloaminy do azotynu, gdzie produktami pośrednimi mogą być NO i N_2O (proces utleniania amoniaku do azotanów przebie-

ga w dwóch etapach, pierwszym powstającym związkiem jest hydroksyloamina, która następnie jest utleniana do azotynu) [4, 26].

Rys. 4. Biologiczne przemiany azotu, na podstawie [16]

Fig. 4. Biological nitrogen conversions

Denitryfikacja jest procesem redukcji azotanów lub azotynów do produktów gazowych. Całkowita denitryfikacja polega na redukcji NO_3^- do NO_2^- , NO , N_2O i N_2 [16]. Końcowym produktem denitryfikacji jest azot cząsteczkowy (N_2), jednak w warunkach niepełnej denitryfikacji dochodzi do akumulacji związków pośrednich m.in. tlenków i podtlenków azotu. Często ograniczenie dostępu związków węgla powoduje akumulację pośrednich produktów redukcji, takich jak: NO_2^- i N_2O oraz ich emisję [17]. Istnieją badania potwierdzające, że niektóre bakterie prowadzą denitryfikację wyłącznie do etapu powstania N_2O .

Do oszacowania emisji N_2O z oczyszczalni ścieków można stosować wytyczne Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, w których od 2006 r. obniżony został współczynnik standardu emisji podtlenku azotu z 1% do 0,5% zawartości azotu odpływającego z oczyszczalni (oba współczynniki są nadal używane) [12]. Podawany w raportach zakres wartości współczynnika standardu emisji od 0,5 do 1% określony został na podstawie emisji z gleb. W krajach z wysoko rozwiniętym systemem oczyszczania ścieków może być przyjmowany niższy współczynnik bezpośredniej emisji N_2O , wynoszący 3,2 g N/osobę · rok, co odpowiada 0,035% emisji tego gazu z ładunku azotu na oczyszczalni ścieków [16, 17]. W literaturze oraz w raportach ICPP występują duże rozbieżności w ocenie wielkości emisji N_2O z obiektów oczyszczalni ścieków, wynoszące odpowiednio od 0,001 do 90% oraz 0,05 - 25% obciążenia ładunkiem azotu [12, 16]. Niemieckie oszacowanie wskaźnika bezpośredniej emisji N_2O

z procesów oczyszczania ścieków, nie uwzględniając dopływu ścieków przemysłowych, wynosi 7,0 g N₂O/osobę · rok [28]. Na podstawie analiz przeprowadzonych w Holandii, wartość tego wskaźnika wynosi 3,2 g N₂O/osobę · rok i również nie obejmuje dopływu ścieków przemysłowych. Powyższa wartość współczynnika została zaproponowana przez Czepiel i wsp. [3]. Natomiast w Stanach Zjednoczonych wartość tego wskaźnika, po uwzględnieniu ładunku azotu ze ścieków przemysłowych, wynosi 4,0 g N₂O/osobę · rok [28]. Według Mosier i wsp. [20] wielkość globalnej emisji podtlenku azotu ze ścieków bytowo-gospodarczych w roku 1990, wyniosła 0,22·10⁶ Mg N/rok, co stanowiło 3,2% całkowitej antropogenicznej emisji tego gazu.

Najbardziej znaczące czynniki, rozpoznane na podstawie literatury, wpływające na emisję podtlenku azotu z oczyszczalni ścieków to: niskie stężenie tlenu rozpuszczonego w procesach nitrifikacji i denitrifikacji, wzrost stężenia azotynów w obu fazach nitrifikacji i denitrifikacji, niski stosunek ChZT/N w fazie denitrifikacji, jak również zwiększenie ładunku azotu w dopływie do oczyszczalni [1, 9, 15, 16, 17, 29].

3. Podsumowanie

Gazy szklarniowe powodują efekt cieplarniany, który niestety nie jest zjawiskiem korzystnym dla naszego globu. Dlatego też istotne jest dążenie do zmniejszania wielkości emisji tych gazów. Oczyszczalnie ścieków, zakwalifikowane do sektora związanego z gospodarką odpadami i ściekami, przyczyniają się do emisji CO₂, CH₄ i N₂O.

Wykorzystanie biogazu w systemie kogeneracyjnym do wytwarzania ciepła i energii elektrycznej ma szereg korzyści: zmniejsza emisję CO₂ i CH₄ oraz koszty energetyczne wynikające z eksploatacji oczyszczalni ścieków. Ujmowanie i wykorzystywanie biogazu jest niezbędne do utrzymania niskiej emisji gazów cieplarnianych. Jeżeli nie jest on wychwytywany będzie odprowadzany do atmosfery, co spowoduje wzrost stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze.

W przypadku emisji N₂O z obiektów oczyszczalni ścieków brak jest pełnego rozpoznania czynników wpływających na jej wielkość, zagadnienie to nadal pozostaje przedmiotem dyskusji w literaturze, stąd też trudno określić bezpośrednie zalecenia dla eksploatatorów oczyszczalni, które pozwolą zmniejszyć ilość emitowanego podtlenku azotu.

Większość dostępnych w literaturze raportów jak też publikacji o wielkości emisji GHG ma charakter szacunkowy. Obliczenia dokonywane są w oparciu o przyjęte kryteria (np. emisja CO₂ oszacowana na podstawie zapotrzebowania w energię), względnie zaproponowane współczynniki określone przez międzynarodowe gremia (np. IPCC). Odczuwa się dotkliwy brak badań, szczególnie pomiarów *in situ*. Dotyczy to większości sektorów antropogenicznej emisji

GHG, w tym przemysłu, rolnictwa jak również pomiarów stężeń CO₂, CH₄ i N₂O z obiektów oczyszczalni ścieków.

Literatura

- [1] Aboobakar A., Cartmell E., Stephenson T., Jones M., Vale P., Dotro G., *Nitrous oxide emissions and dissolved oxygen profiling in a full-scale nitrifying activated sludge treatment plant*, Water Research, Vol. 47, 2013, pp. 524-534.
- [2] Cakir F.Y., Stenstrom M.K., *Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology*, Water Research, Vol. 39, 2005, pp. 4197-4203.
- [3] Czepiel, P., Crill, P., Harriss, R., *Nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment*, Environmental Science and Technology 29 (9), 1995, 2352-2356.
- [4] Desloover J., Vlaeminck S., Clauwaert P., Verstraete W., Boon N., *Strategies to mitigate N₂O emissions from biological nitrogen removal systems*, Biotechnology, vol. 23, 2012, pp. 474-482.
- [5] Diafarou Ali M., *Carbon Dioxide and Methane Emissions from Different Wastewater Treatment Scenarios*, UNESCO – IHE Institute for Water Education, 2009
- [6] El-Fadel M., Massoud M., *Methane emissions from wastewater management*, Environmental Pollution, no 114 (2), 2001, pp. 177.
- [7] Gaj H., Wojtowicz M., Bojarun D., Mizerny J., Szweykowska-Muradin M., Kieli-chowska I., *Raport z oszacowania bilansu emisji gazów cieplarnianych dla obszaru miasta Poznania, uwzględniającego zmiany i działania poprzednich lat (od 1990 r.) wraz ze wskazaniem istotnych obszarów oddziaływania*, 2007.
- [8] Gupta D., Singh S.K., *Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida*, Journal of Water Sustainability, Vol. 2, Issue 2, 2012, pp. 131-139.
- [9] Hanaki K., Hong Z., Matsuo T., *Production of nitrous oxide gas during denitrification of wastewater*, Water Science and Technology, 26 (5-6), 1992, pp. 1027-1036.
- [10] Hu Z., Zhang J., Li S., Xie H., Wang J., Zhang T., Li Y., Zhang H. *Effect of aeration rate on the emission of N₂O in anoxic-aerobic sequencing batch reactors (A/O SBRs)*, Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol. 109, No. 5, 2010, 487-491.
- [11] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. In *Chapter 4, Atmospheric Chemistry and Greenhouse gases*.
- [12] IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.). IGES, Japan, pp. 6.24-26.26.
- [13] IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (eds)], Cam-

bridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA., pp. 497-560.

- [14] IPCC 2007: *Zmiana klimatu 2007: Raport Syntetyczny. Wkład grup roboczych I, II i III do Czwartego Raportu Oceniającego Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu*, Wydawnictwo IOS, Warszawa, 2009.
- [15] Itokawa H., Hanaki K., Matsuo T., *Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition*, Water Research, 35 (3), 2001, pp. 657–664.
- [16] Kampschreur M. J., Temmink H., Kleerebezem R., Jetten M.S.M., van Loosdrecht M.C.M., *Nitrous oxide emission during wastewater treatment*, Water Research, Vol. 43, 2009, pp. 4093-4103.
- [17] Kampschreur M.J., van der Star W.R.L., Wielders H.A., Mulder J.W., Jetten M.S.M., van Loosdrecht M.C.M., *Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment*, Water Research, 42 (3), 2008, pp. 812–826.
- [18] Keller J., Hartley K., *Greenhouse gas production in wastewater treatment: process selection is the major factor*, Water Science and Technology, Vol. 47, No 12, pp. 43–48.
- [19] Miksch K., Sikora J., *Biotechnologia ścieków*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2010, s. 53.
- [20] Mosier A., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S., van Cleemput O., *An overview of the revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology for nitrous oxide from agriculture*, Environmental Science and Policy, 2 (3), 1999, pp. 325–333.
- [21] Prendez M., Lara-Gonzalez S., *Application of strategies for sanitation management in wastewater treatment plants in order to control/reduce greenhouse gas emissions*, Journal of Environmental Management, no 88, 2008, pp. 658–664.
- [22] Podedworna J., Umiejewska K., *Technologia osadów ściekowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008.
- [23] Polityka Klimatyczna Polski, *Strategie redukcji emisji gazów cieplarnianych w Polsce do roku 2020*, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2003.
- [24] Raport Głównego Urzędu Statystycznego, *Ochrona Środowiska 2011*, Departament Badań Regionalnych i Środowiska, Warszawa, 2011, www.stat.gov.pl
- [25] Rodriguez-Garcia G., Hospido A., Bagley D.M., Moreira M.T., Feijoo G. *A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants*, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 37, 2012, pp. 37-46.
- [26] Sadecka Z., *Podstawy biologicznego oczyszczania ścieków*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2010, s. 178-187.
- [27] Snip L., *Quantifying the greenhouse gas emissions of waste water treatment plants*, Environmental Sciences, Netherlands, 2010, pp. 8-13.
- [28] Thomsen M., Lyck E., *Emission of CH₄ and N₂O from Wastewater Treatment Plants (6B)*, NERI Technical Note, no. 208, Denmark, 2008.

- [29] Quan X., Zhang M., Lawlor P.G., Yang Z., Zhan X., Nitrous oxide emission and nutrient removal in aerobic granular sludge sequencing batch reactors, *Water Research*, Vol. 46, 2012, pp. 4981-4990.
- [30] Wilk J., Wolańczyk F., *Problemy energetyczne wykorzystania odpadów z oczyszczalni ścieków*, *Polityka Energetyczna*, tom 11, zeszyt 2, 2008, 139-149.
- [31] Yerushalmi L., Haghighat F., Shahabadi M.B., *Contribution of On-Site and Off-Site Processes to Greenhouse Gas (GHG) Emissions by Wastewater Treatment Plants*, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 30 2009, pp. 613-617.
- [32] <http://www.managenergy.net/download/nr317.pdf> [dostęp: 25.06.2013]
- [33] http://www.mos.gov.pl/g2/big/2009_04/40d7b7e72383c6785294c36f84270c48.pdf [dostęp: 26.06.2013 r.]

GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT

Summary

Greenhouse gases (GHG), basically methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2) and nitrous oxide (N_2O), occur at atmospheric concentrations of ppbv to ppmv under natural conditions. Increase emissions of these gases from anthropogenic sources cause increasing of their concentration in time and affects on climate change. Carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) can all be produced in wastewater treatment operations. Their greenhouse effect is typically weighted by their Global Warming Potentials (GWP) which is dependent on the timeframe of consideration, usually 100 years. Based on a review of the literature, the main greenhouse gases generated in the technological line of sewage treatment plant have been characterized. Also done a recognition of the factors that influence their emissions. Identified the participation of different sectors (like agriculture, energy supply industry, etc.) in total emissions of anthropogenic GHG. Discussed the main sources of GHG emissions from wastewater treatment plant and the processes in which they are produced. Particular attention was paid to the processes that generate CO_2 and CH_4 in aerobic and anaerobic conditions. Done an analysis of the biochemical transformations of nitrogen including nitrification and denitrification in terms of production of nitrous oxide. Attention was drawn on estimated balancing of GHG emissions sources based on accepted criteria and rates of standards, pointed an acute shortage of research, in particular measurements *in situ*.

Keywords: greenhouse gases, Global Warming Potential (GWP), wastewater treatment, aerobic and anaerobic processes.

DOI: 10.7862/rb.2013.51

Przesłano do redakcji w lipcu 2013 r.

Przyjęto do druku we wrześniu 2013 r.