

# Innowacyjna technologia oczyszczania odcieków pofermentacyjnych

Krzysztof Barbusiński

W ostatnich latach obserwuje się szybki postęp w opracowywaniu i wdrażaniu innowacyjnych technologii usuwania azotu z odcieków pochodzących z odwadniania przefermentowanych osadów. Istota tego problemu została opisana w publikacji [1]. Są to technologie usuwania azotu w tzw. bocznym ciągu technologicznym, a więc przed zawróceniem odcieków do głównego ciągu technologicznego. Idea usuwania azotu z osadów w bocznym ciągu technologicznym polega na oczyszczeniu tych odcieków, zanim trafią do głównego ciągu oczyszczania. Stosuje się tutaj głównie procesy biologiczne, najprostsze do zastosowania w oczyszczalniach komunalnych, z wykorzystaniem osadu czynnego. Są to nowoczesne i efektywne technologie, wśród których na uwagę zasługują procesy SHARON®, BABE®, połączenie procesu SHARON® i ANAMMOX®, a także proces DEMON® [1, 2, 3]. Obecnie rozwiązania te zaczynają być wdrażane w coraz większym stopniu w oczyszczalniach komunalnych, chociaż z uwagi na innowacyjność tych technologii nie są to jeszcze działania zakrojone na dużą skalę. Z uwagi na dobre wyniki technologiczne i ekonomiczne uzyskiwane w skali technicznej oraz szereg zalet w porównaniu z innymi technologiami – proces DEMON® jest ciekawym i bardzo obiecującym rozwiązaniem godnym szerszego propagowania.

## 1. Podstawy procesu DEMON®

Technologia DEMON® (*DE-amMONnification*) została opracowana w Austrii. Polega na usuwaniu azotu z odcieków na drodze częściowej nityfikacji oraz procesu deamonifikacji (Anammox®), realizowanych w jednym reaktorze typu SBR w warunkach ścisłej kontroli pH. Fakt ten powoduje, że kubatura reaktora w porównaniu z innymi tego typu technologiami jest stosunkowo mała, a zastosowanie specjalnego hydrocyklonu zatrzymującego bakterie deamonifikacyjne (o małej szybkości wzrostu) rozwiązuje problem ich małego stężenia w reaktorze. Częściowa nityfikacja polega na takim prowadzeniu procesu, żeby nastąpiło jedynie utlenianie azotu amonowego do azotanów(III), a blokowana jest druga faza nityfikacji, czyli utlenianie azotanów(III) do azotanów(V). Ideę usuwania azotu z wykorzystaniem skróconej nityfikacji zobrazowano na rysunku 1. W wyniku utleniania azotu amonowego jedynie do azotanów(III) zmniejsza się o 25% zapotrzebowanie na tlen oraz o około 40% na węgiel organiczny niezbędny dla efektywnej denityfikacji azotanów(III). Ułatwia to prowadzenie procesu w warunkach deficytu węgla organicznego dla denityfikacji i może eliminować potrzebę stosowania zewnętrznego źródła węgla organicznego ( $C_{org}$ ). Bardzo mały jest też przyrost osadu

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono innowacyjną technologię usuwania azotu z odcieków po odwadnianiu przefermentowanych osadów ściekowych. Technologia DEMON® jest obecnie najszybciej wdrażanym procesem wykorzystującym bakterie „anammox” do oczyszczania takich odcieków w bocznym ciągu technologicznym, czyli zanim zostaną zawrócone do głównego ciągu oczyszczania. Opisano podstawy procesu, sterowanie systemem napowietrzania oraz wyposażenie reaktora.

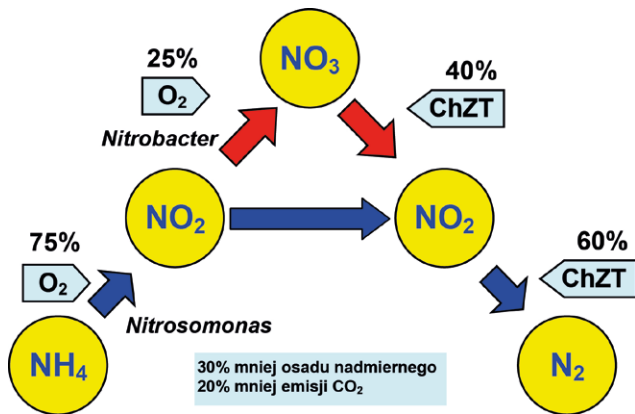
Słowa kluczowe: DEMON®, oczyszczanie ścieków, innowacyjne technologie, odcieki z odwadniania osadów

**Abstract:** The paper presents innovative technology to remove nitrogen from the effluent after dewatering the digested sludge. The DEMON® technology is currently the fastest implemented process using bacteria „anammox” for the purification of such effluents in the side stream, that is, before they are returned to the main purification system. Moreover, in the publication has been describes the basics of system operation, aeration system control and reactor equipment.

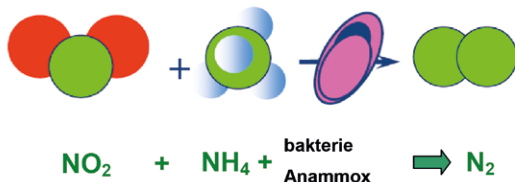
Keywords: DEMON®, wastewater treatment, innovative technologies, effluent from the sludge dewatering

i produkcja  $CO_2$ . Z kolei w miejsce tradycyjnej denityfikacji wprowadza się proces Anammox® (*ANAerobic AMMonia OXidation* – anaerobowe utlenianie amoniaku) polegający na tym, że azot amonowy i azotany(III) przekształcane są do wolnego azotu ( $N_2$ ) w warunkach beztlenowych przez autotroficzne bakterie, takie jak *Brocadia anammoxidans*, *Kuenenia stuttgartiensis* czy *Scalindua sorokinii*. Bakterie te, nazywane dalej bakteriami „anammox”, przekształcają w azot cząsteczkowy około 50% azotu amonowego i 50% azotanów(III) bez konieczności dodawania zewnętrznego źródła węgla organicznego, ponieważ bakterie „anammox” są autotrofami (rys. 2).

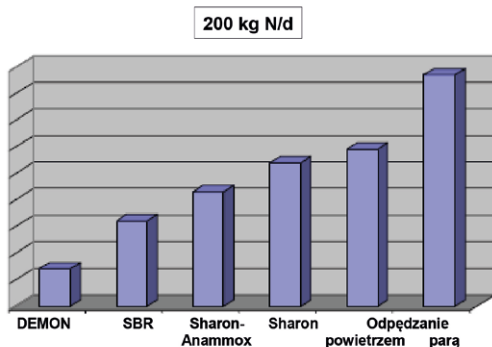
Głównym problemem w procesie Anammox® jest bardzo mała szybkość wzrostu bakterii „anammox”. Z tego względu w innych instalacjach wykorzystujących te bakterie konieczne jest prowadzenie procesu przy wysokich stężeniach bakterii „anammox”. Jednak w reaktorze DEMON® stosuje się opatentowane separatory (hydrocyklony) w celu oddzielenia bakterii „anammox” od typowego kłaczkowatego osadu czynnego i za-



Rys. 1. Idea usuwania azotu z wykorzystaniem skróconej nitryfikacji



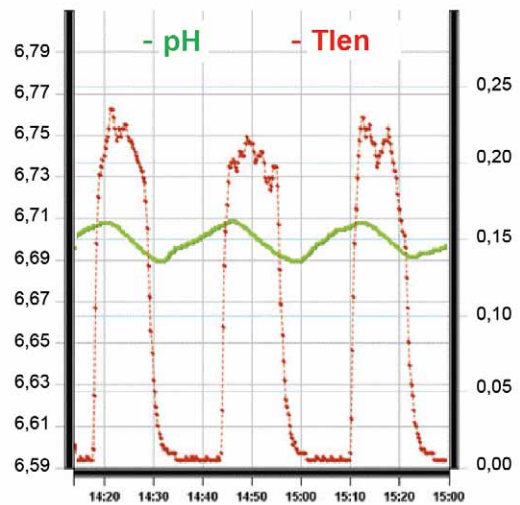
Rys. 2. Uproszczona idea procesu ANAMMOX® [4]



Rys. 3. Poglądowe porównanie kosztów poszczególnych metod usuwania azotu [5]

wrócenia ich do reaktora SBR. Eliminuje to problem rozwoju i utrzymania odpowiedniego stężenia tych bakterii w reaktorze.

Na rysunku 3 przedstawiono poglądowo różnice kosztów eksploatacyjnych poszczególnych procesów usuwania azotu w bocznym ciągu. Widać, że proces DEMON® wypada w tym porównaniu najlepiej. Inne zalety procesu DEMON® to przede wszystkim bardzo mały przyrost osadu czynnego (kłaczkowatego) z uwagi na niskie stężenie tlenu w reaktorze (max. 0,3 do 0,5 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>), brak konieczności stosowania zewnętrznego źródła węgla nawet w przypadku niewielkiej ilości węgla organicznego w odciekach (bakterie deamonifikacyjne są autotrofami) oraz o około 60% mniejsze zużycie energii w porównaniu z klasycznym procesem nitrifikacja/denitrifikacja.



Rys. 4. Sterowanie procesem DEMON – pomiar pH skojarzony z systemem napowietrzania [6]

## 2. Sterowanie procesem DEMON®

Kluczowymi parametrami w procesie DEMON® są czas reakcji, pH i stężenie tlenu. Czas napowietrzania uzależniony jest od zmian wartości pH. Istotą tego sterowania jest fakt, że utlenianie azotu amonowego do azotanów(III) obniża wartość pH, natomiast w procesie anaerobowego utleniania amoniaku za pomocą bakterii „anammox” następuje wzrost pH. System napowietrzania jest aktywowany przy górnej wartości „nastawy” pH. Wyłączenie napowietrzania następuje przy dolnej wartości „nastawy” pH. Różnica pomiędzy górną i dolną wartością brzegową pH jest niewielka. Tak więc w procesie DEMON® jeden pełny cykl oczyszczania odcieków w reaktorze SBR, składa się z wielu cykli cząstkowych: napowietrzania oraz mieszania. Pełny cykl oczyszczania, jak w każdym reaktorze SBR kończy faza sedimentacji i spustu. Napowietrzanie jest tak dobrane, żeby stężenie tlenu nie przekraczało 0,3–0,5 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, co zapobiega utlenianiu azotanów(III) do azotanów(V). Niskie stężenie tlenu ogranicza szybkość wzrostu bakterii utleniających azotany(III), przez co są one „wymywane” z reaktora. Z uwagi na bardzo małą szybkość wzrostu bakterii „anammox” system DEMON® pracuje przy długim wieku osadu (ok. 20 dni).

W systemie DEMON® nadzorowanie procesu skróconej nitrifikacji jest stosunkowo proste, ponieważ proces ten jest sterowany automatycznie za pomocą precyzyjnego pomiaru pH skojarzonego z systemem napowietrzania (rys. 4) [6]. Efektywność usuwania azotu w reaktorze DEMON® może wynosić 80–90%.

## 3. Przebieg procesu DEMON®

### Proces technologiczny

Odcieki ze stacji odwadniania trafiają najczęściej do zbiornika retencyjnego odcieków, z którego tłoczone są do reaktora DEMON. Następnie zdeamonifikowane (oczyszczone) odcieki odprowadzane są do głównego ciągu technologicznego oczyszczalni ścieków. Proces deamonifikacji w reaktorze DEMON

najczęściej prowadzony jest w cyklu 8-godzinnym, składającym się z następujących faz:

- praca (z napełnianiem, przemiennym napowietrzaniem i mieszaniem) – 7 h;
- sedimentacja – 0,5 h;
- dekantacja – 0,5 h.

Równoległe z cyklem zasadniczej pracy reaktora DEMON® prowadzone jest odzyskiwanie bakterii deamonifikacyjnych „anammox” z osadu nadmiernego i zwracanie ich do reaktora DEMON®. W tym celu stosuje się opatentowany hydrocyklon (fot. 1), stanowiący element wyposażenia reaktora. Osad granulowany (zawierający bakterie „anammox”) powraca do reaktora DEMON, natomiast osad czynny kłaczkowaty odprowadzany jest do reaktorów biologicznych w głównym ciągu oczyszczania ścieków. Schemat działania hydrocyklonu przedstawiono na rysunku 5. Rozdział bakterii „anammox” od typowego osadu czynnego (fot. 2) w hydrocyklonie uzyskuje się dzięki różnicy gęstości pomiędzy biomasą w postaci kłaczków osadu czynnego i granuli bakterii „anammox”. Granulat bakterii deamonifikacyjnych o większej gęstości opada grawitacyjnie w hydrocyklonie, natomiast kłaczkowaty osad czynny unoszone są do góry [6, 7].

W systemie automatyki pomiarowej analizowane są: stężenie tlenu, temperatura, przewodność oraz pH. Główny reaktor DEMON® wyposażony jest w system napowietrzający (ruszt, dwie dmuchawy), pompę podającą zawartość reaktora na hydrocyklon, mieszadło oraz hydrocyklon. Schemat i zasadę działania reaktora DEMON® przedstawiono na rysunku 6. Obecnie rozruchy technologiczne reaktorów DEMON® są bardzo krótkie, ponieważ granule bakterii amonifikacyjnych dostarcza się z zewnątrz, a więc nie trzeba ich namnażać w samym reaktorze, co z uwagi na ich wolny wzrost wymagałoby bardzo długiego czasu rozruchu.

#### 4. Przykłady istniejących instalacji DEMON® w Europie

W roku 2010 w skali technicznej proces DEMON® eksploatowany był w 9 oczyszczalniach: w Austrii (1), Szwajcarii (3), Niemczech (3), Holandii (1) i na Węgrzech (1). Sześć następnym było w budowie: Austria (2), Serbia (1), Holandia (1) i Niemcy (2). Można przyjąć, że liczba tych instalacji w 2013 roku przekroczyła już 40, łącznie ze Stanami Zjednoczonymi i innymi krajami poza Europą (rys. 7).

Według stanu na grudzień 2015 roku ilość instalacji DEMON® na całym świecie przekroczyła już 70. Przykładowo nowe instalacje wybudowano w: Seattle, Klagenfurcie, Jerozolimie, Vigo, Odense. W październiku uruchomiono także pierwszą w Polsce instalację DEMON® w oczyszczalni ścieków „Kujawy” w Krakowie.

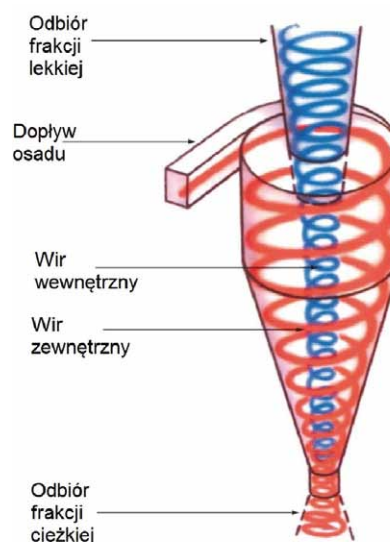
Na fotografiach 3–6 pokazano przykładowe reaktory DEMON® w oczyszczalni York River (USA), Heidelberg (Niemcy), Apeldoorn (Holandia) i Nieuwegein (Holandia).

#### 5. Instalacja DEMON® w Polsce

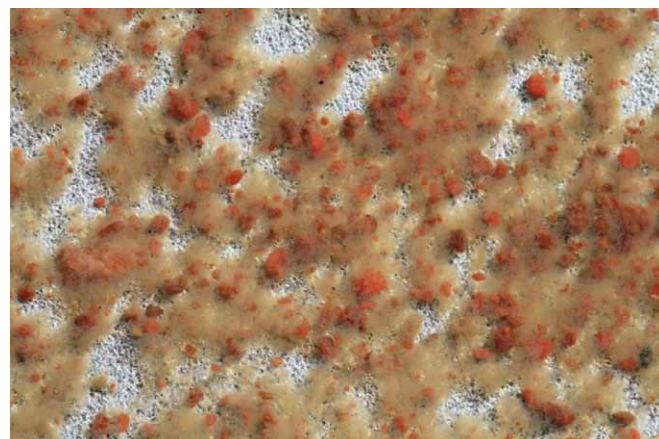
Jak już wspomniano, pierwsza w Polsce instalacja DEMON® została aktualnie uruchomiona w oczyszczalni ścieków „Kujawy” w Krakowie. Rozruch technologiczny instalacji zakończono w październiku 2015. Lokalizację reaktora DEMON®



Fot. 1. Widok hydrocyklonu [6]



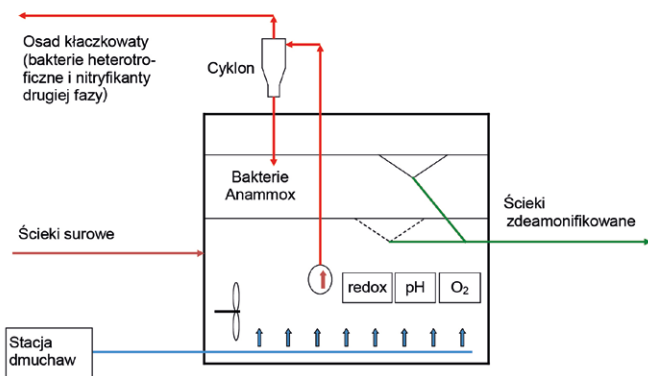
Rys. 5. Zasada działania hydrocyklonu [7]



Fot. 2. Typowy osad DEMON®: granule „anammox” (czerwone), bakterie typowego osadu czynnego (kolor brązowy) [7]

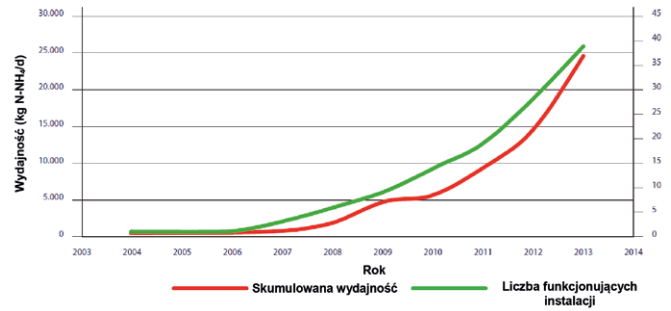


SCHEMAT CYKLICZNEGO REAKTORA DEAMONIFIKACYJNEGO



Rys. 6. Schemat i zasada działania reaktora DEMON®

do deamonifikacji odcieków osadowych w oczyszczalni ścieków „Kujawy” przedstawiono na fotografii 7. Instalacja DEMON® obejmuje dekanter (zbiornik uśredniający) oraz główny reaktor DEMON®. Zbiornik uśredniający zainstalowano pod powierzchnią gruntu, co pozwala na utrzymanie stabilnej temperatury odcieków pofermentacyjnych. Gwarantowana przez dostawcę technologii redukcja azotu amonowego wynosi od 85 do 92% [11].



Rys. 7. Liczba funkcjonujących instalacji DEMON® na świecie wraz ze skumulowaną wydajnością w aspekcie obciążenia ładunkiem azotu amonowego do 2013 [6]

## 5. Podsumowanie

Innowacyjna technologia DEMON® łączy w sobie procesy skróconej nityfikacji i deamonifikacji. Zaletą tej technologii jest usuwanie azotu w jednym reaktorze typu SBR, a także zastosowanie specjalnego hydrocyklonu do oddzielania granuli bakterii deamonifikacyjnych od kłaczkowatego osadu czynnego i zwracania ich do procesu, przez co w reaktorze utrzymuje się (pomimo bardzo wolnego wzrostu) odpowiednio duże stężenie



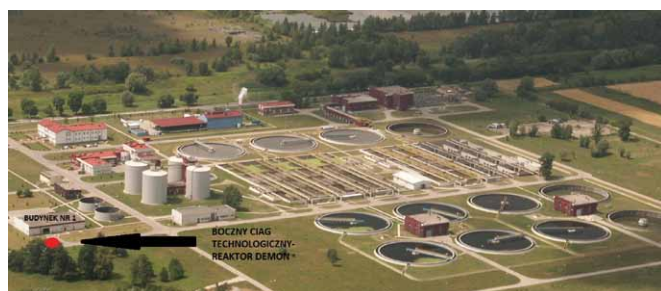
Fot. 3. Instalacja DEMON w oczyszczalni w York River (stan Waszyngton) zbiornik na odcieki (po lewej), reaktor DEMON (po prawej) [8]



Fot. 6. Nieuwegein, Holandia [6]



Fot. 4. Heidelberg, Niemcy; 2 reaktory po 550 m<sup>3</sup> [9]



Fot. 7. Oczyszczalnia ścieków „Kujawy” (zmodyfikowana) [12]



Fot. 5. Apeldoorn, Holandia [10]

bakterii deamonifikacyjnych i nie obserwuje się zjawiska ich wymywania z reaktora.

Sterowanie procesem odbywa się przy pomocy precyzyjnego pomiaru pH sprzężonego z systemem napowietrzania. Skutkuje to prostotą układu technologicznego oraz odpornością na dobowe wahania ilości odcieków i stężenia azotu. Z uwagi na niskie stężenie tlenu w reaktorze, bardzo mały przyrost osadu oraz brak konieczności stosowania zewnętrznego źródła węgla organicznego proces jest bardzo ekonomiczny i znacznie tańszy od procesu usuwania azotu w klasycznym systemie nityfikacja/denitryfikacja. Technologia DEMON® ma już ponad 70 wdrożeń na całym świecie, co potwierdza jej zalety.

### Literatura

- [1] BARBUSIŃSKI K.: *Usuwanie związków azotu z odcieków po odwadnianiu przefermentowanych osadów*. „Forum Eksploatatora” 1/2011, s. 36–41.

- [2] WETT B., OMARI A., PODMIRSEG S.M., ET. AL.: *Going for main-stream deammonification from bench to full scale for maximized resource efficiency*. „Water Science & Technology” vol. 68, nr 2/2013, s. 283.
- [3] BARBUSIŃSKI K.: *Innowacyjne technologie oczyszczania ścieków komunalnych – kierunki rozwoju*. „Napędy i Sterowanie” 1/2016, s. 40–45.
- [4] VEREIJKEN T.: *Developments in Dutch Water Technology*. Netherlands Water Partnership. [www.watertechnologie.com/show-download.cfm?objecttype=mark.hive.contentobjects.download](http://www.watertechnologie.com/show-download.cfm?objecttype=mark.hive.contentobjects.download).
- [5] <http://www.essdemon.com/en/demon/cost-of-demon-procedures> (7.01.2016).
- [6] <http://www.grontmij.com/highlights/water-and-energy/Documents/DEMON-sustainable-nitrogen-removal-deammonification.pdf> (7.01.2016).
- [7] ZARZYCKI R.: *Prezentacja „Nowoczesne rozwiązania w gospodarce osadowej”*. Wawatech. Listopad 2015.
- [8] NIFONG A, NELSON A, JOHNSON CH, BOTT CH. B.: *Performance of a Full-Scale Sidestream DEMON® Deammonification Installation*.
- [9] [http://www.azv-heidelberg.de/3\\_04\\_meile4.htm](http://www.azv-heidelberg.de/3_04_meile4.htm) (7.01.2016).
- [10] <http://www.logisticon.com/nl/demon-demon> (7.01.2016).
- [11] Projekt: Oczyszczalnia ścieków „Kujawy” w Krakowie. Oczyszczanie ścieków z obróbki osadu pofermentacyjnego za pomocą procesu DEMON®. Instrukcja obsługi. Kraków 2015.
- [12] <http://www.mpwik.krakow.pl/27/Oczyszczalnia-ścieków-Kujawy> (7.01.2016).

prof. dr hab. inż. Krzysztof Barbusiński – Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

artykuł recenzowany