

Stanisław MIODOŃSKI, Mateusz MUSZYŃSKI-HUHAJŁO\*

## ZMIENNOŚĆ SZYBKOŚCI ZUŻYCIA AZOTU AMONOWEGO (AUR) PODCZAS ROZRUCHU PROCESU SKRÓCONEJ NITRYFIKACJI

W artykule zaprezentowano możliwości wykorzystania sond jonoselektywnych azotu amonowego oraz azotu azotanowego(V) do rozruchu procesu skróconej nityfikacji, prowadzonej na strumieniu odcieków z odwadniania osadów po procesie fermentacji metanowej. Sondę jonoselektywną wykorzystano do wyznaczania szybkości ubytku azotu amonowego. Przed przystąpieniem do rozruchu wykonano wstępną walidację wartości AUR (ang. *Ammonia Uptake Rate*), wyznaczonej za pomocą sondy jonoselektywnej. Rozruch procesu skróconej nityfikacji przeprowadzono z powodzeniem osiągając wysoki poziom akumulacji azotanów(III) w ciągu 6 dni przy pełnym utlenieniu azotu amonowego. Uzyskane wyniki wskazywały jednoznacznie na wywołanie selektywnej inhibicji bakterii prowadzących II fazę nityfikacji (NOB – ang. *Nitrite Oxidizing Bacteria*), zapewniając jednocześnie warunki dla rozwoju nityfikantów I fazy (AOB – ang. *Ammonia Oxidizing Bacteria*). Kontrola parametru AUR pozwoliła na uzyskanie stabilnych i wysokich wydajności wykorzystania azotu amonowego po około 2 tygodniach prowadzenia rozruchu, a także stanowiła informację na temat potencjalnych możliwości dalszego zwiększania obciążenia reaktora.

### 1. WSTĘP

Potencjalne zaostrenie wymagań dotyczących jakości ścieków oczyszczonych związane ze zmianami prawnymi lub rosnące obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń poszczególnych oczyszczalni ścieków sprawia, że coraz większą rolę przykłada się do rozwoju zaawansowanych technologii usuwania biogenów, stanowiących korzystną inwestycyjnie alternatywę dla rozbudowy bloków biologicznych, a co za tym idzie całego obiektu. W przypadku biologicznego usuwania azotu ze ścieków wspomniane trendy

---

\* Katedra Technologii Oczyszczania Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Plac Grunwaldzki 9, 50-377 Wrocław, stanislaw.miodonski@pwr.edu.pl, mateusz.muszynski-huhajlo@pwr.edu.pl.

uzasadniają wzmożone zainteresowanie procesami pozwalającymi zmniejszyć obciążenie głównego ciągu technologicznego ładunkiem azotu, poprzez procesy pozwalające na zagospodarowanie bocznego strumienia odcieków pochodzących z procesów fermentacji metanowej, które (na przykładzie danych z Niemieckich oczyszczalni ścieków) mogą wносить od 15–25% dobowego ładunku N dla całego obiektu [4]. Spośród szeregu technologii pozwalających na usuwanie azotu ze strumienia odcieków, na największą uwagę zasługuje proces ANAMMOX, pozwalający na autotroficzne utlenienie azotu amonowego przy wykorzystaniu azotanów(III) [9]. Aby proces mógł przebiegać prawidłowo, niezbędne jest dostarczenie ścieków o odpowiedniej proporcji azotu amonowego i azotanów(III) [12], a co za tym idzie, efektywne prowadzenie procesu skróconej nitryfikacji, czy to w oddzielnym reaktorze (deamonifikacja dwustopniowa) czy też w tym samym zbiorniku, w którym znajdują się mikroorganizmy prowadzące proces ANAMMOX (deamonifikacja jednostopniowa) [1]. Wraz z rosnącą ilością tego typu instalacji konieczne jest posiadanie szerokiej wiedzy z zakresu rozruchu wspomnianych procesów, zwłaszcza w formie łatwej do przyswojenia dla osób bezpośrednio odpowiedzialnych za obsługę rzeczywistych instalacji. Zdolność do ponownego szybkiego rozruchu instalacji oraz umiejętność radzenia sobie w przypadku sytuacji awaryjnych są niezwykle istotne biorąc pod uwagę specyficzny skład oczyszczanych odcieków, a także wrażliwość bakterii autotroficznych prowadzących deamonifikację, na różne czynniki środowiskowe [6].

### 1.1. URZĄDZENIA POMIAROWE A ROZWÓJ TECHNOLOGII OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

Rozwój zaawansowanych i coraz bardziej złożonych technologii nie byłby możliwy bez rozwoju na rynku produktów pozwalających mierzyć i gromadzić informacje dotyczące prowadzonego procesu w postaci szeregu zaawansowanych czujników, systemów pomiarowych i algorytmów sterowania. Koniec lat 90. XX w. przyniósł wyraźną zmianę w sposobie kontroli procesów w oczyszczalniach ścieków – wraz z pojawieniem się dopracowanych czujników szeregu wielkości fizycznych i chemicznych, a także wcześniejsze rozpowszechnienie się systemów SCADA (ang. *Supervisory Control and Data Acquisition*) stało się możliwe mierzenie w czasie rzeczywistym praktycznie wszystkich możliwych parametrów na każdym etapie oczyszczania ścieków [13]. Dla optymalizacji usuwania azotu z odcieków niezwykłą przydatność wykazały sondy jonoselektywne (ISE, ang. *Ion-Selective Electrodes*) zapewniające rzeczywisty pomiar stężenia azotu amonowego i azotanów(V) oraz dopracowane sondy tlenu rozpuszczonego, które w połączeniu z algorytmami sterowania pozwoliły na optymalizację napowietrzania i tym samym ograniczenie energochłonności nitryfikacji [2, 5]. Bezpośredni pomiar stężenia związków azotu pozwala w sposób precyzyjny monitorować i kontrolować przebieg biologicznych przemian azotu, co jest powszechnie wykorzystywane zarówno do sterowania w głównym ciągu technologicznym oczyszczalni (np. odmienne strategie napowietrzania w zależności od profilu stężenia  $N-NH_4$  [11]), jak również

w technologiach wykorzystywanych do oczyszczania bocznego strumienia odcieków (np. kontrola długości fazy tlenowej w celu uzyskania odpowiedniego stosunku  $N-NH_4/N-NO_2$  do procesu Anammox). Oczywistą korzyścią płynącą ze stosowania czujników *in-situ* jest szybkie pozyskiwanie informacji na temat stężeń substancji istotnych dla prawidłowego działania instalacji oraz ich automatyczne gromadzenie. Mierniki *ex-situ* wymagają instalacji do poboru próbek oraz bardzo często wymagają jej przygotowania (zwykle filtracji) przed dokonaniem pomiaru, co zwiększa poziom złożoności instalacji pomiarowej i wydłuża czas od poboru próbki do uzyskania informacji. Specyfika obu metod wykonywania pomiarów sprawia, że pod kątem kosztów obsługi i konserwacji czujniki *in-situ* są korzystniejsze finansowo, wymagają jednak regularnej kalibracji oraz weryfikacji ich wskazań [7, 14].

## 1.2. CEL PRACY

Celem pracy jest wyznaczenie zmienności szybkości zużycia azotu amonowego (AUR, ang. *Ammonia Uptake Rate*) podczas rozruchu procesu skróconej nityfikacji w reaktorze SBR w skali półtechnicznej wykorzystywanej jako pierwszy stopień deamonifikacji prowadzonej na strumieniu odcieków pochodzących z odwadniania osadów przefermentowanych rzeczywistego obiektu. Wartości AUR wyznaczano na podstawie zmienności stężenia azotu amonowego, mierzonego przy użyciu sond jonoselektywnych, w celu wykazania przydatności czujników *on-line* na etapie rozruchu wspomnianego procesu, jak również podczas występowania problemów z eksploatacją reaktora.

## 2. MATERIAŁY I METODY

Opisywane doświadczenia prowadzono w instalacji pilotowej wyposażonej w 4 stanowiska badawcze w postaci reaktorów SBR wraz z osprzętem. W jednym z reaktorów przeprowadzono rozruch procesu skróconej nityfikacji na strumieniu odcieków z odwadniania osadów po fermentacji metanowej, którego celem jest nitytacja dostarczonego ładunku azotu amonowego, a powstałe na tym etapie odcieki bogate w azotany(III) stanowiły materiał do przygotowywania odcieków (po zmieszaniu z odciekami surowymi w odpowiedniej proporcji) na cele procesu Anammox prowadzonego w sąsiednim reaktorze (dane nie zamieszczone).

## 2.1. STANOWISKO BADAWCZE – REAKTOR SBR

Reaktor SBR, w którym prowadzono rozruch, ma kształt prostopadłościennego zbiornika o objętości czynnej 150 dm<sup>3</sup>. Na kompletny reaktor, poza zbiornikiem, składa się również osprzęt w postaci elementów wykonawczych i kontrolnych (rysunek 1):

- elementy wykonawcze:

mieszadło mechaniczne o wale pionowym, układ napowietrzania (dmuchawa, elektryczny zawór upustowy, talerzowy dyfuzor membranowy), grzałka elektryczna, pompa odcieków surowych, pompa odcieków oczyszczonych, pompa osadu nadmiernego, pompa dozująca roztwór NaOH (połączona ze zbiornikiem roztworu NaOH),

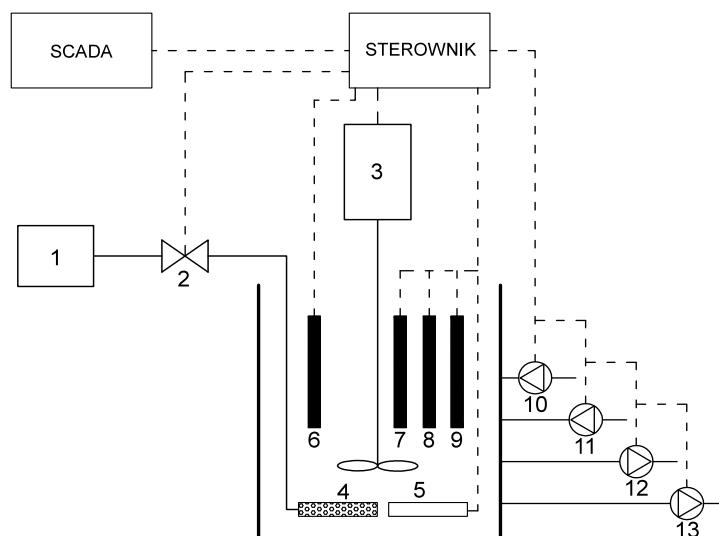
- elementy pomiarowe:

hydrostatyczna sonda poziomu, sonda tlenu rozpuszczonego (optyczna sonda Endress Hauser), sonda pH/REDOX (zintegrowana sonda Endress Hauser z pomiarem temperatury), rotametr (przepływ powietrza), czujnik temperatury (w sondzie pH/REDOX), sonda jonoselektywna N-NH<sub>4</sub> i N-NO<sub>3</sub> (AN-ISE firmy Hach).

Za kontrolę nad elementami wykonawczymi układów do kontroli pH oraz stężenia tlenu rozpuszczonego odpowiadały regulatory PID. Napełnianiem/dekantacją reaktora sterował algorytm opierający się na pomiarach poziomu zawartości reaktora. Cykle pracy reaktorów skonstruowano w oparciu o predefiniowane przez użytkownika interwały czasowe pomiędzy poszczególnymi fazami cyklu, na które składały się: napełnianie, reakcja (mieszanie i napowietrzanie), sedymentacja oraz dekantacja. Osad nadmierny pobierano pod koniec fazy reakcji jako mieszaninę osadu czynnego i ścieków. Wszystkie dane gromadzone są poprzez system SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) z minimalnym interwałem 1 s.

## 2.2. JONOSELEKTYWNA SONDA N-NH<sub>4</sub> I N-NO<sub>3</sub> (AN-ISE HACH)

Ze względu na istotną rolę w prowadzonych badaniach, autorzy zdecydowali się przybliżyć charakterystykę wykorzystywanego urządzenia. Stanowisko badawcze jest wyposażone w pojedynczą sondę jonoselektywną do ciągłego pomiaru stężenia N-NH<sub>4</sub> i N-NO<sub>3</sub> w ściekach. Prowadzony pomiar ma charakter potencjometryczny i bazuje na elektrodach jonoselektywnych (ISE).



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego, 1 – dmuchawa powietrza, 2 – zawór regulacyjny, 3 – mieszadło mechaniczne, 4 – dyfuzor napowietrzający, 5 – grzałka, 6- sonda  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ , 7 – sonda tlenu rozpuszczonego, 8 – sonda pH/REDOX, 9 – sonda hydrostatyczna poziomą, 10 – pompa odcieków surowych, 11 – pompa roztworu NaOH (korekta pH), 12 – pompa osadu nadmiernego, 13 – pompa odcieków oczyszczonych

Tabela 1. Dane techniczne sondy N- $\text{NH}_4$  i N- $\text{NO}_3$  [3]

Parametr	Wartość	Uwagi
Zakres pomiarowy	0–1000 $\text{mg}/\text{dm}^3$	N- $\text{NH}_4$ , N- $\text{NO}_3$ , $\text{K}^+$ , $\text{CL}^-$
Dokładność	$\pm 5\% + 0,2 \text{ mg}/\text{dm}^3$	% mierzonej wartości
Czas odpowiedzi	< 3 min	-
Zakres pH	5–9	-
Temperatura próbki	2–40°C	-

Głowica sondy wyposażona jest w 4 elektrody pomiarowe oraz elektrodę referencyjną, którą jest elektroda dyferencyjna pH. Potasowa elektroda ISE jest stosowana do korekty wskazań stężenia azotu amonowego pod względem obecności jonów potasowych, natomiast chlorkowa elektroda ISE stosowana jest do korekty stężenia azotanów pod względem obecności jonów chlorkowych (rysunek 2). Czystość elektrod zapewniana jest poprzez układ sprężonego powietrza, który okresowo przedmuchiwa głowicę pomiarową sondy usuwając nagromadzone zanieczyszczenia. Ponadto sonda była czyszczona ręcznie raz w tygodniu. Zgodnie z zaleceniami producenta, okresowo wykonywano jednopunktową kalibrację matrycy dla wszystkich parametrów – decyzję o kalibracji podejmowano na podstawie codziennej weryfikacji wskazań sondy przy

użyciu metody referencyjnej (test kuwetowy – metoda z błękitem indofenolowym). Tabela 1 prezentuje wybrane parametry czujnika podawane przez producenta [3].

### 2.3. METODYKA WYKORZYSTANYCH OZNACZEŃ CHEMICZNYCH

Aby potwierdzić przydatność pomiaru za pomocą sondy jonoselektywnej do wyznaczenia wartości AUR, wykonano test AUR, który przeprowadzono w reaktorze, w którym zamontowano sondę w warunkach eksploatacyjnych typowych dla prowadzonego procesu. Była to zmodyfikowana na własne cele procedura przedstawiona w [8]. Źródłem azotu amonowego do testu były rzeczywiste odcieki z pras taśmowych odwadniających osad przefermentowany, które stanowiły źródło zasilania reaktora przez cały analizowany w pracy okres.

Oznaczenia chemiczne wykonywane na potrzeby doświadczeń były realizowane przy wykorzystaniu testów kuwetowych i spektrofotometru DR3900 firmy Hach. W ramach prezentowanych doświadczeń wykorzystywano następujące typy fotometrycznych testów: azot amonowy LCK303 (2–47 mg N-NH<sub>4</sub>/dm<sup>3</sup>) oraz LCK302 (47–130 mg N-NH<sub>4</sub>/dm<sup>3</sup>), azot azotanowy(V) LCK340 (5–35 mg N-NO<sub>3</sub>/dm<sup>3</sup>), azot azotanowy(III) LCK342 (0,6–6 mg N-NO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>).

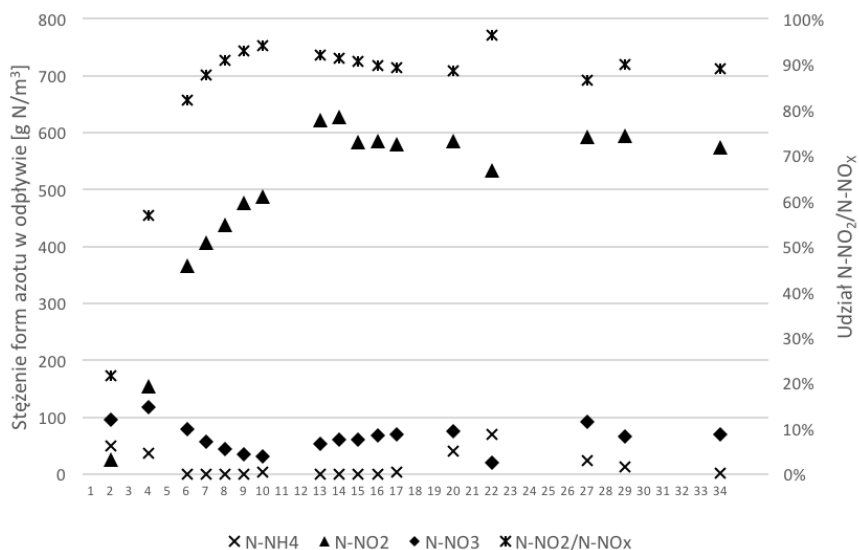
## 3. WYNIKI

### 3.1. ROZRUCH SKRÓCONEJ NITRYFIKACJI

Dane, na podstawie których obliczono wartości AUR, zbierano podczas rozruchu procesu skróconej nitryfikacji. Inokulum procesu był osad nadmierny pochodzący z komunalnej oczyszczalni ścieków o RLM > 500 000 mieszkańców równoważnych. Efekt selektywnej inhibicji II fazy nitryfikacji osiągnięto poprzez właściwie kontrolowanie wartości wybranych parametrów, takich jak niski wiek osadu, wysoka temperatura, alkaliczny odczyn skutkujący wysokim stężeniem wolnego amoniaku oraz niskie stężenie tlenu. Szerszy opis mechanizmów inhibicji na bazie doniesień literaturowych przedstawiono w [10].

Warunki eksploatacyjne utrzymywane podczas rozruchu pozwoliły osiągnąć wyraźną inhibicję bakterii NOB (prowadzących II fazę nitryfikacji), na co wskazywała wyraźna akumulacja azotu azotanowego(III) w odciekach oczyszczonych (od 6 doby utrzymywała się wyraźnie powyżej 80% ogółu utlenionych form azotu). W odpływie z reaktora nie odnotowywano istotnych ilości azotu amonowego, poza niewielkimi problemami natury technicznej, które zakłóciły pracę reaktora w okolicach 24 doby eksperymentu. W trakcie prowadzenia eksperymentu następowało sukcesywne zwiększanie

obciążenia reaktora z około  $0,2 \text{ kg N-NH}_4/\text{m}^3 \text{ d}$  w ciągu pierwszego tygodnia do poziomu około  $0,4\text{--}0,5 \text{ kg N-NH}_4/\text{m}^3 \text{ d}$  po 18. dniu prowadzonego doświadczenia. W czasie prowadzonego rozruchu reaktor pracował na ogół stabilnie (problemy jedynie od 20. do 24. doby), a założone cele procedury rozruchowej procesu skróconej nityfikacji zostały osiągnięte: osiągnięto wyraźną akumulację azotu azotanowego(III) oraz praktycznie pełne utlenienie azotu amonowego. Parametry odcieków oczyszczonych w opisywanym okresie przedstawiono na rysunku 2.



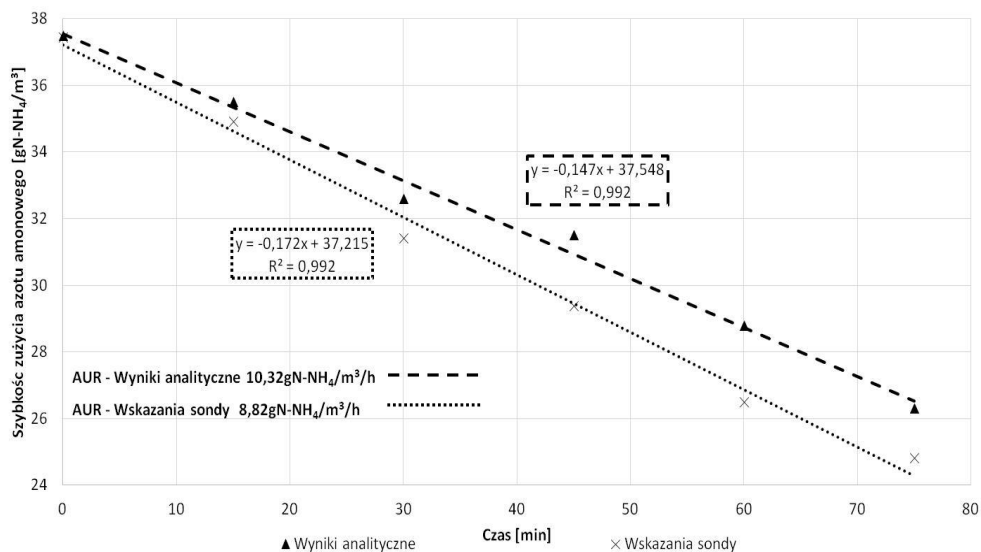
Rys. 2. Stężenia form azotu oraz poziom akumulacji azotanów(III) w odpływie z reaktora podczas rozruchu

### 3.2. WALIDACJA WSKAZAŃ SONDY – TEST AUR

Pierwszym etapem było wyznaczenie początkowej szybkości zużycia azotu amonowego osadu wykorzystanego do rozruchu. Powyższe działanie miało na celu uzyskanie dwóch efektów: kolejności wyznaczenia początkowych parametrów obciążenia reaktora, jak również weryfikację wskazań sondy jonoselektywnej. Na rysunku 3 przedstawiono zestawienie szybkości uzyskanej podczas testu AUR wykonywanego metodą analityczną oraz na podstawie wskazań sondy.

Pomimo kalibracji udało się uzyskać jedynie zbliżone wyniki, jednak rozbieżność poniżej 15% uznano za akceptowalną do zastosowań inżynierskich. W dalszej części rozruchu AUR kontrolowany był jedynie za pomocą sondy jonoselektywnej.

Faktyczny rozruch, rozumiany jako zmiana parametrów osadu w reaktorze od wartości początkowych do stabilnych wartości końcowych, trwał około 10–12 dób. W tym czasie odnotowano sukcesywny i znaczący wzrost szybkości nityfikacji I fazy (na co jednoznacznie wskazywał wzrost wartości AUR) przy jednoczesnym niewielkim spadku nityfikacji II fazy (rozumianej jako NPR – ang. *Nitrate Production Rate*). Rysunek 4 przedstawia zmienność czasową wartości AUR i NPR.



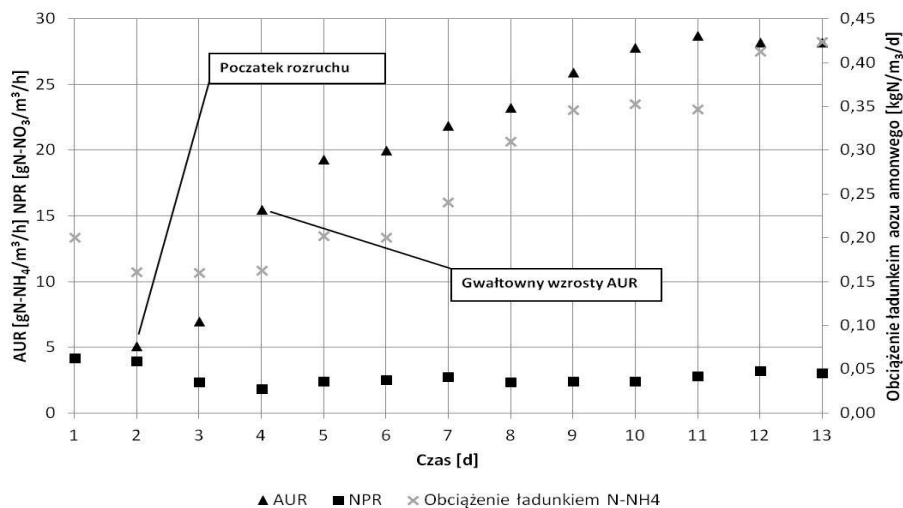
Rys. 3. Stężenie azotu amonowego podczas pomiaru AUR w celu walidacji wskazań sondy

Dobę po rozpoczęciu rozruchu różnica pomiędzy wartościami AUR i NPR była zauważalna i w kolejnych dniach powiększała się. W 4 dobie zaobserwowano gwałtowny wzrost AUR, który postępował sukcesywnie do 10 doby eksperymentu, po której rozpoczęła się stabilizacja.

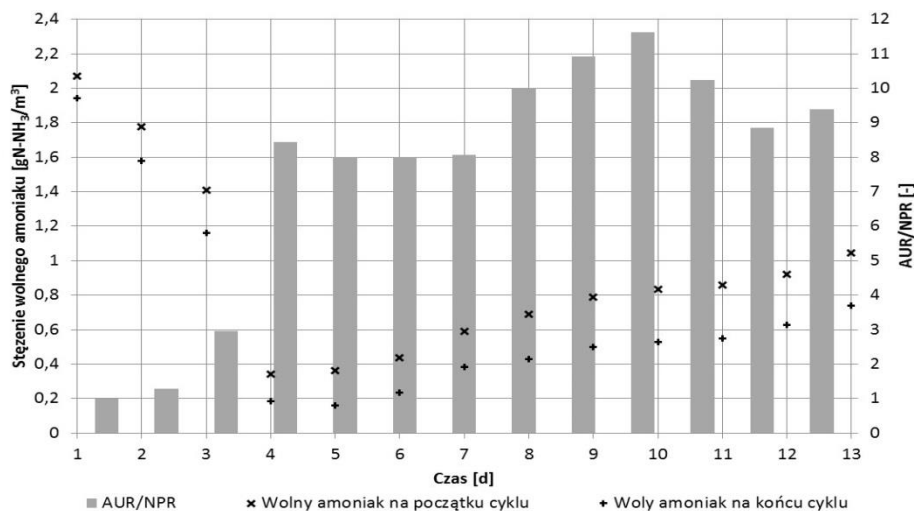
Gwałtowna zmiana dynamiki zużycia azotu amonowego (4. doba badań) przełożyła się na drastyczne obniżenie stężenia azotu amonowego i dalej - również na obniżenie stężenia wolnego amoniaku (FA, ang. *Free Ammonia*), co nie pozostało bez wpływu na dalszy rozruch procesu. Na rysunku 5 przedstawiono zmianę stosunku szybkości I oraz II fazy nityfikacji (rozumianej jako stosunek AUR/NPR) na tle stężenia wolnego amoniaku w reaktorze. Jak widać, w początkowych dobach stężenie wolnego amoniaku było stosunkowo wysokie i przekraczało próg inhibicji dla bakterii NOB. Znaczne przyspieszenie procesu (tj. I. fazy nityfikacji), bez odpowiednio radykalnego zwiększenia obciążenia reaktora, spowodowało gwałtowny spadek stężenia FA do poziomu, przy którym inhibicja nityfikantów II fazy była wyraźnie słabsza. W kolejnych dniach podjęto decyzję o zwiększeniu obciążenia reaktora, niemniej jednak stosunek szybkości I. i II



fazy nityfikacji pozostawał na zbliżonym poziomie (około 8). Wraz ze wzrostem stężenia wolnego amoniaku do poziomu około  $0,6\text{--}0,7\text{ g N-NH}_3/\text{m}^3$  nastąpiła zmiana stosunku AUR/NPR (w wyniku rosnącego udziału bakterii AOB), osiągając w najwyższym punkcie wartość ponad 11 razy większą, niż wzrost stężenia azotu azotanowego(V) powstałego na skutek aktywności bakterii NOB.



Rys. 4. Wartości AUR oraz NPR wg wskazań sondy jonoselektywnej



Rys. 5. Stężenie wolnego amoniaku na początku i pod koniec pojedynczego cyklu pracy SBR (OŚ główna), stosunek AUR/NPR (oś pomocnicza)

#### 4. DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy danych można stwierdzić, że przyjęta strategia pozwala na uruchomienie kompletnego procesu częściowej nityfikacji w czasie nie przekraczającym dwóch tygodni. Zaobserwowana akumulacja azotu azotanowego (III) świadczy o znacznym wzroście udziału nityfikantów I fazy w biocenozie osadu czynnego obecnego w reaktorze. Niewielkie stężenia azotu azotanowego(V) wskazują, że przyjęte parametry eksploatacyjne zapewniły wyraźną inhibicję bakterii NOB.

Przeprowadzona walidacja sondy jonoselektywnej wykazała niewielkie rozbieżności względem wyników analitycznych skutkujących zaniżeniem rzeczywistej wartości AUR o około 15%. Rozbieżność ta jest efektem wybranej metody kalibracji matrycy sondy. Kalibracje wykonywano metodą jednopunktową, która charakteryzuje się wysoką dokładnością wskazań w bezpośrednim sąsiedztwie wartości na którą skalibrowano miernik. W takim przypadku błąd wskazań rośnie wraz ze wzrostem różnicy pomiędzy wartością mierzoną, a wartością kalibracyjną (zależność widoczna na rysunku 3). Alternatywą dla przyjętej metodologii może być kalibracja dwupunktowa, która powinna zapewnić stałą wartość błędu w szerszym zakresie mierzonych wartości, a co za tym idzie większą dokładność przy wyznaczaniu wskaźników takich, jak AUR. Wynika to z faktu, że tego typu parametry bazują na zmienności w czasie i nie wymagają pomiaru rzeczywistej wartości z dużą dokładnością.

Na podstawie wskazań sondy jonoselektywnej udało się z powodzeniem wyznaczać szybkość ubytku azotu amonowego oraz przyrostu azotu azotanowego(V). Określenie zmienności powyższych wartości w czasie pozwala na sprawne kontrolowanie procesu skróconej nityfikacji, jak również wyznaczanie zmienności obciążenia reaktora ładunkiem azotu amonowego w kolejnych dobach rozruchu. Rozważanym kierunkiem dalszych badań będzie próba optymalizacji czasu rozruchu oraz eksploatacji reaktora do procesu częściowej nityfikacji w oparciu o dynamiczne wyznaczanie obciążenia ładunkiem azotu amonowego na podstawie zmiany wartości AUR.

#### LITERATURA

- [1] ALI M., OKABE S., *Anammox-based technologies for nitrogen removal: advances in process start-up and remaining issues*, Chemosphere, 2015, Vol. 141, 144–153.
- [2] ÅMAND L., OLSSON G., CARLSSON B., *Aeration control – a review*, Water Science and Technology, 2013, Vol. 67, No. 11, 2374–2398.
- [3] AN-ISE sc: *Kombinowana sonda do pomiaru zawartości amonu i azotanów*, broszura informacyjna firmy Hach (<http://pl.hach.com/asset-get.download.jsa?id=25593616575>, dostęp 1.02.2016).
- [4] JARDIN N., THÖLE D., WETT B., *Treatment of sludge return liquors: experiences from the operation of full-scale plants*, Proceedings of the Water Environment Federation, 2006, Vol. 7, 5237–5255.
- [5] JENKINS, D., WANNER, J., *Activated sludge: 100 years and counting*, IWA Publishing, 2014.

- [6] JIN, R.C., *The inhibition of the Anammox process: a review*, Chemical Engineering Journal, 2012, Vol. 197, 67–79.
- [7] KAELIN D., EUGSTER J., ROTTERMANN K., BANNINGER C., SIEGRIST H., *Potential of in-situ sensors with ion-selective electrodes for aeration control at wastewater treatment plants*, Water Science and Technology, 2008, Vol. 58, No. 3, 629.
- [8] KRISTENSEN G.H., JORGENSEN P.E., HENZE M., *Characterization of functional microorganism groups and substrate in activated sludge and wastewater by AUR, NUR and OUR*, Water Science and Technology, 1992, Vol. 25, No. 6, 43–57.
- [9] LACKNERS., *Full-scale partial nitrification/anammox experiences—an application survey*, Water Research, 2014, Vol. 55, 292–303.
- [10] MUSZYŃSKI-HUHAJŁO M., *Częściowa nitryfikacja jako istotny element nowoczesnych metod usuwania azotu ze ścieków*, [w:] Interdyscyplinarne Zagadnienia w Inżynierii i Ochronie Środowiska. Tom 5, praca zbiorowa pod red. J. Wiśniewskiego, M. Kutylowskiej, A. Trusz-Zdybek, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2015, 254–263.
- [11] SIEGRISTH., RIEGER L., FUX C., WEHRLI M., *Improvement of nitrogen removal at WWTP Zurich Werdhoelzli after connection of WWTP Zurich-Glatt*, Water Science and Technology, 2004, Vol. 50, No.7, 35–43.
- [12] STROUS M., KUENEN J.G., JETTEN M.S.M., *Key Physiology of Anaerobic Ammonium Oxidation*, Applied and Environmental Microbiology, 1999, Vol. 65, No. 7, 3248.
- [13] TSAGARAKIS K.P., STAMATELATOU K., *Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency*, International Water Assn, 2015.
- [14] WINKLER S., RIEGER L., SARACEVIC E., PRESSL A., GRUBER, G., *Application of ion-sensitive sensors in water quality monitoring*, Water Science and Technology, 2004, Vol. 50, No.11, 105–114.

#### AMMONIA UPTAKE RATE (AUR) VARIABILITY DURING A NITRITATION PROCESS START-UP

Nitrification process start-up in a pilot-scale SBR reactor treating real reject water from sludge dewatering was successfully accomplished. AUR (ammonia uptake rate) and NPR (nitrate production rate) values were calculated during the start-up phase based on ammonia nitrogen and nitrate nitrogen concentration changes measured with an ion-selective electrode (ISE) sensor. Results have shown that a significant AUR rate improvement was observed during first 10 days of plant operation. Process conditions such as: short SRT (solids retention time), low dissolved oxygen level and high free ammonia concentrations provided an effective inhibition of nitrite oxidizing bacteria which was confirmed by low NPR rates, which were significantly lower than AUR rates. Collected data confirmed that ISE sensors could be an important element of start-up and operation methodology for biological N-removal processes.