

dr Anna DMOCHOWSKA
dr Dariusz DMOCHOWSKI
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego SGSP

Badanie efektywności wytypowanych anod w procesie elektROUTLENIANIA, mierzonej ubytkiem amoniaku i zanieczyszczeń organicznych w czasie elektrolizy odcieków ze składowiska odpadów komunalnych

Omówienie
LEAD

Proces elektrochemicznego utleniania jest obiecującą metodą oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. W badaniach zastosowano pośrednie elektROUTLENIANIE anodowe, które różni się od bezpośredniego tym, że zanieczyszczenia nie adsorbują się i nie utleniają na powierzchni anody tylko są utleniane w roztworze, gdzie znajduje się utleniacz. Efektywność wytypowanych anod Pt/Ir, Ru/Sn, Ir/Sn, Sn/Pb/Ru, mierzono ilością usuniętego amoniaku i spadkiem wartości ChZT. Z wytypowanych anod najbardziej efektywną okazała się anoda SPR tj Sn/Pb/Ru. W wyniku elektrolizy uzyskano całkowite usunięcie barwy odcieków, bardzo istotne zmniejszenie wartości ChZT oraz całkowite usunięcie amoniaku, co powoduje, że w dalszym procesie oczyszczania odcieków może zostać pominięty etap nityfikacji i denityfikacji.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia w odciekach ze składowisk komunalnych, elektrochemiczne oczyszczanie odcieków, pośrednie elektROUTLENIANIE anodowe.

Wstęp

W badaniach nad pośrednim elektROUTLENIANIEM anodowym zanieczyszczeń obecnych w odciekach, różni autorzy wykorzystywali najczęściej jedną anodę. Niewielu badaczy w swoich pracach porównywało efektywność kilku anod [3]. W jednym z niewielu przypadków badaniom poddano anody: grafit, SPR, Ti/Pb, Ti/Ru. Elektrolizowano odcieki surowe o następujących wartościach wskaźników zanieczyszczenia: ChZT – 5000 mg/l O₂, N_{NH4+} – 3000 mg/l, Cl⁻ – 7500 mg/l. Najbardziej efektywną okazała się anoda SPR, po elektrolizie trwającej 240 min, prowadzonej przy gęstości prądu – 15 A/dm² uzyskano całkowity ubytek jonów amonowych oraz 92% ubytek wartości ChZT [1].

Inni autorzy badali anody: Ti/Sn i Ti/Pb, jednak elektrolizie poddawano odcieki, wcześniej oczyszczane metodami biologicznymi. Ich wartości wskaźników zanieczyszczeń wynosiły: ChZT – 1200 mg/l O₂, N-NH₄ – 380 mg/l, Cl⁻ – 1600 mg/l. W tego typu badaniach anoda Ti/Sn okazała się najbardziej efektywna. Przy wydajności prądowej 10% uzyskano pełne usunięcie jonów amonowych oraz zmniejszenie wartości ChZT o 91% [2].

Do innych badań, pobrano odcieki oczyszczone wcześniej w procesie anaerobowym. W procesie elektrochemicznym zastosowano anodę Ti/Sn. Wartości wskaźników zanieczyszczenia wynosiły: ChZT – 1 610 mg/l O₂, N-NH₄ – 1480 mg/l, Cl⁻ – 2010 mg/l. Stosując gęstość prądu 3,23 A/dm² w czasie 6 godzin, uzyskano pełne usunięcie jonów amonowych oraz zmniejszenie wartości ChZT o 87% [7, 8].

Poddawano także elektrolizie odcieki surowe o bardzo wysokiej zawartości zanieczyszczeń: ChZT – 53 300 mg/l O₂, N-NH₄ – 1 080 mg/l, Cl⁻ – 3500 mg/l. Stosując anodę Ti/Pt, po 60 min elektrolizy, całkowicie usunięto azot amonowy, a wartość ChZT zmniejszyła się o 84%. Zaobserwowano, że przy niższej wartości pH odcieków, następował spadek efektywności usuwania związków organicznych, oraz wzrost efektywności usuwania jonów amonowych [6].

W elektrochemicznym procesie oczyszczania odcieków surowych, stosowano również anodę Ti/Ru/Ir, przy gęstości prądu 5,4 A/dm², w czasie 240 min uzyskano spadek stężenia jonów amonowych o 99,6% i spadek wartości ChZT o 78% [5].

W trzyetapowym procesie oczyszczania stosowano koagulację chemiczną, proces elektrotleniania i oczyszczanie biologiczne. Pierwszy etap pozwolił na obniżenie ChZT z wartości 1941 mg/l O₂ o 51%. Po drugim etapie sumaryczny spadek wartości ChZT wzrósł do 85%. Końcowy etap związany z oczyszczaniem biologicznym, doprowadził do obniżenia wartości ChZT o 95% w stosunku do wartości początkowej [9, 10].

Cytowani autorzy prowadzili proces elektrolizy do momentu uzyskania największego ubytku wartości ChZT.

1. Obiekt i metodyka badań

Do badań nad efektywnością usuwania zanieczyszczeń organicznych i jonów amonowych wytypowano cztery anody: Pt/Ir, Ru/Sn, Ir/Sn oraz Sn/Pb/Ru (SPR), z którymi przeprowadzono proces pośredniego elektrotleniania anodowego zanieczyszczeń zawartych w odciekach ze składowiska odpadów komunalnych Łubna.

Na fot. 1 i 2 przedstawiono miejsce poboru próbek odcieków oraz sposób ich pobierania.



Fot. 1. Studzienka z odciekami

Źródło: fot. A. Dmochowska.



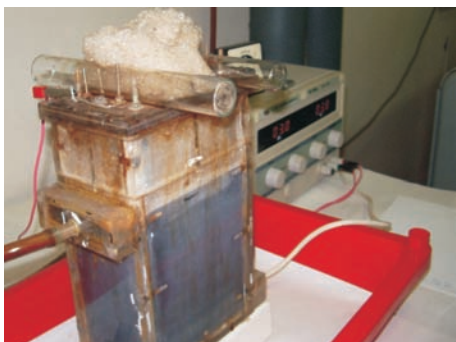
Fot. 2. Pobór próbek

Źródło: fot. A. Dmochowska.

2. Stanowisko badawcze

W pleksiglasowym elektrolizerze o wymiarach $200 \times 120 \times 70$ mm umieszczono równoległe i na przemian 2 anody i 3 stalowe katody. Każda elektroda miała wymiary: $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Odległość między elektrodami wynosiła 12 mm. Elektrody zawieszono w pokrywie elektrolizera przy pomocy prętów ze stali nierdzewnej. Za każdym razem objętość próbki wynosiła 1000 ml. Badania prowadzono dla wytypowanych gęstości prądu 2, 3, 4 A/dm^2 . W początkowym etapie elektrolizy, gdy proces przebiegał szybko, próbki do badań fizyko-chemicznych pobierano co 5 min. W końcowym etapie elektrolizy, dla ustalenia dokładnego czasu zaniku jonów amonowych próbki pobierano co 1 min. Każdorazowo oznaczano również wartość ChZT.

Na fot. 3 przedstawiono stanowisko badawcze w trakcie prowadzenia procesu elektrolizy, a na 4 próbki odcieków po wytypowanych czasach elektrolizy.



Fot. 3. Stanowisko badawcze w trakcie elektrolizy

Źródło: fot. A. Dmochowska.



Fot. 4. Próbki odcieków po wytypowanych czasach elektrolizy

Źródło: fot. A. Dmochowska.

3. Metodyka analityczna

Efektywność wytypowanej anody w usuwaniu azotu amonowego i zanieczyszczeń organicznych oceniano na podstawie oznaczeń:

- chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT), metodą dichromianową wg PN-ISO 15705,
- azotu amonowego – metodą bezpośredniej nessleryzacji, wg PN-ISO 7150:2002. Przed oznaczeniem usuwano chlor za pomocą roztworu tiosiarczanu sodu.

4. Analiza wyników

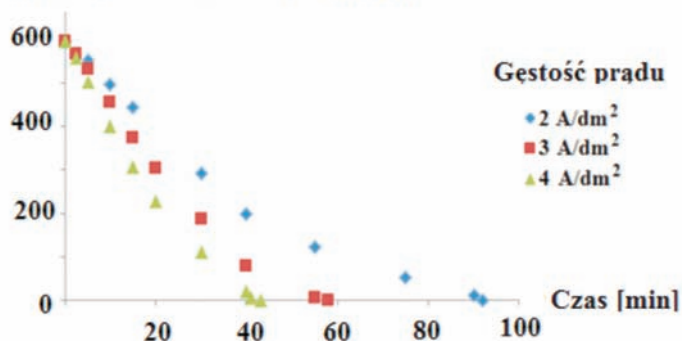
W tabeli 1 zebrano wyniki wybranych badań fizyko-chemicznych dla odcieków surowych.

Tabela 1. Wyniki wybranych badań fizyko-chemicznych odcieków surowych pobranych ze składowiska odpadów komunalnych Łubna

Lp.	Oznaczenie	Jednostka	Odcieki				
			A	B	C	D	E
1	Azot amonowy	mg/l	597	600	426	399	698
2	ChZT	mg/l O ₂	3919	3012	4625	2507	4790
3	Chlorki	mg/l	3598	3600	2894	5850	3246

Na rys. 5 przedstawiono zmiany stężenia jonów amonowych podczas prowadzenia procesu elektrolizy dla odcieków A, anody SPR, przy gęstościach prądu 2, 3, 4 A/dm². W przypadku pozostałych próbek odcieków oraz wytypowanych anod, charakter zmian był podobny, zmienny był tylko czas usuwania zanieczyszczeń. Na rys. 6 przedstawiono zmiany stężenia jonów amonowych w trakcie elektrolizy odcieków A, dla wszystkich anod, po jednakowych czasach trwania procesu elektrolizy, w celu porównania efektywności usuwania zanieczyszczeń dla tych anod.

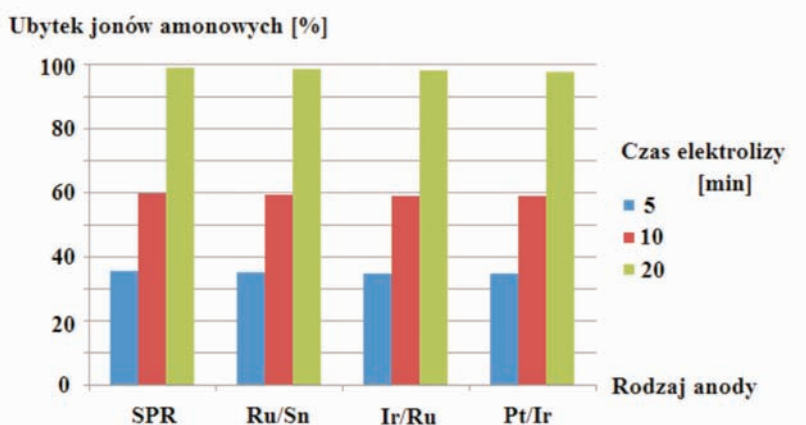
Zmiany stężenia jonów amonowych [mg/l]



Rys. 5 Zmiany stężenia jonów amonowych w trakcie procesu elektrolizy z użyciem anody SPR
Źródło: [4].

Czasy trwania elektrolizy oraz usunięty ładunek zanieczyszczeń, przy użyciu wybranych anod był przybliżony. Można więc wnioskować, że efektywność anod, mierzona ubytkiem jonów amonowych [%] jest bardzo zbliżona, nie mniej malała ona w szeregu:

- dla gęstości prądu 2 A/dm^2 : SPR[28,0] > Ru/Sn[27,6] > Ir/Ru[27,4] > Pt/Ir[27,3],
- dla gęstości prądu 3 A/dm^2 : SPR[30,1] > Ru/Sn[29,5] > Ir/Ru[29,3] > Pt/Ir[29,1],
- dla gęstości prądu 4 A/dm^2 : SPR[29,9] > Ru/Sn[29,3] > Ir/Ru[29,1] > Pt/Ir[29,0].



Rys. 6. Ubytek jonów amonowych wyrażony (w %), dla wszystkich wytynpowanych anod oraz wytynpowanych czasów elektrolizy

Źródło: [4].

Dla wykorzystanych w badaniach anod i odcieków przebieg zmian wartości stężenia jonów amonowych był zbliżony. Pełne usunięcie jonów amonowych z odcieków A uzyskano po czasach [min]:

- przy gęstości prądu 2 A/dm^2 : SPR [92], Ru/Sn [93], Ir/Ru [94], Pt/ Ir [96].

Przy wyższych gęstościach prądu czasy elektrotleniania jonów amonowych były krótsze, i tak:

- dla gęstości prądu 3 A/dm^2 malały one w szeregu: SPR [58], Ru/Sn [59], Ir/Ru [59], Pt/Ir [60].

Dla wszystkich anod czasy te były jednak zbliżone. Do takiego wniosku prowadzi porównanie efektywności anod dla tych samych gęstości prądu i dla jednakowych czasów elektrolizy.

Dla odcieków A (badania wykonano kilkakrotnie), przy gęstości prądu 2 A/dm^2 efektywność anod mierzona spadkiem wartości stężenia jonów amonowych [% ubytku] malała w szeregu:

- po 10 min: SPR [16,9], > Ru/Sn [16,6], > Ir/Ru [16,4], > Pt/ Ir [16,1],
 - po 40 min: SPR [66,8], > Ru/Sn [66,7], > Ir/Ru [66,1], > Pt/ Ir [65,8],
- dla gęstości 3 A/dm^2
- po 10 min: SPR [23,6] > Ru/Sn [23,5] > Ir/Ru [23,1] > Pt/Ir [22,8],

– po 40 min: SPR [86,6] > Ru/Sn [86,4] > Ir/Ru [86,1] > Pt/Ir [85,9]
dla gęstości 4 A/dm²:

– po 10 min: SPR [32,8] > Ru/Sn [32,6] > Ir/Ru [32,4] > Pt/Ir [31,9],

– po 40 min: SPR [96,3] > Ru/Sn [96,2] > Ir/Ru [95,9] > Pt/Ir [95,6].

Zgodnie z oczekiwaniami, większa gęstość prądu zapewniała w określonym czasie elektrolizy większy spadek wartości stężenia jonów amonowych.

Natomiast różnice wystąpiły w wartościach anodowej gęstości prądu, zapewniającej maksymalną wydajność prądową procesu.

Gęstość prądu, przy której występowała maksymalna wydajność prądowa dla wszystkich prób odcieków wynosiła 3 A/dm². Tylko w nielicznych eksperymentach maksymalną wydajność uzyskiwano przy 2 i 4 A/dm². Dla odcieków A i gęstości prądu 2 A/dm², czas pełnego usunięcia jonów amonowych wyniósł 92 min, a odpowiadająca temu wydajność ich usuwania – 28%.

Wyniki uzyskane dla pozostałych odcieków potwierdziły, iż gęstość prądu, przy której występowała maksymalna wydajność usuwania jonów amonowych wynosiła najczęściej 3 A/dm².

Na wydajność prądową wpływ miało stężenie zanieczyszczeń organicznych.

Dla odcieków charakteryzujących się wyższymi wartościami ChZT, jak np. odcieki A – 3919 mg/l O₂ przy stężeniu chlorków – 3598 mg/l i jonów amonowych 597 mg/l, wydajności prądowe usuwania jonów amonowych [%] przy gęstościach prądu 3 A/dm² [30,0%] i 4 A/dm² [29,7%] były bardzo do siebie zbliżone i przewyższały wartości uzyskiwane przy gęstości 2 A/dm² [28%]. Analogicznie dla odcieków B o wartości ChZT – 3012 mg/l O₂, stężeniu jonów chlorkowych – 3600 mg/l i jonów amonowych – 600 mg/l wydajności prądowe przy 3 i 4 A/dm² wynosiły odpowiednio 33,8% i 33,6%, natomiast dla gęstości 2 A/dm² wydajność była niższa i wynosiła 32,3%.

W przypadku odcieków E o niższej wartości ChZT – 2346 mg/l O₂, znacznej zawartości chlorków – 4790 mg/l stężeniu jonów amonowych – 698 mg/l, wydajność prądowa usuwania jonów amonowych, uzyskana przy gęstości prądu 2 A/dm² [42,1%] była tylko nieznacznie mniejsza od uzyskanej przy gęstości 3 A/dm² [42,2%], ale większa od wydajności uzyskanej przy gęstości prądu 4 A/dm² [41,1%]. Dla odcieków D o wartości wskaźnika ChZT – 2507 mg/l O₂, znacznym stężeniu jonów chlorkowych – 5850 mg/l i stężeniu jonów amonowych – 399 mg/l, dla gęstości prądu 2 i 3 A/dm² wydajności prądowe usuwania jonów amonowych wynosiły odpowiednio: 33,6% i 33,8% i były większe od wydajności uzyskanej przy gęstości 4 A/dm² – 32,4%.

Wyniki te świadczą, iż gęstość prądu, zapewniająca maksymalną wydajność prądową procesu elektrootleniania jonów amonowych, przesuwa się w kierunku większych jej wartości wraz ze wzrostem stężenia zanieczyszczeń organicznych ulegających elektrootlenianiu.

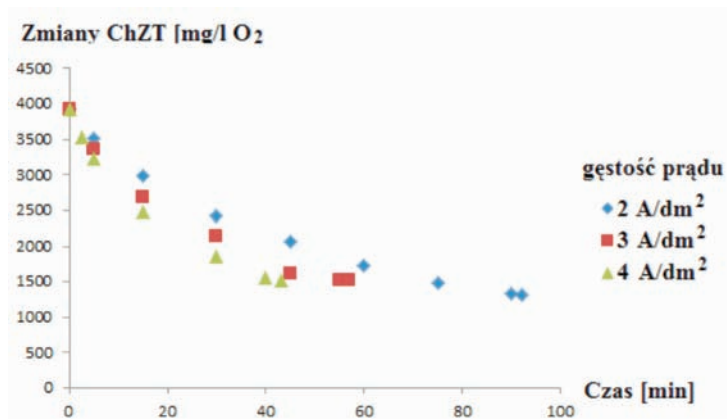
Wartości wydajności prądowych pozwalają na wyciągnięcie wniosków dotyczących jej zależności od stężenia reagentów. Główny wpływ na to ma stężenie

jonów chlorkowych. Im jest ono wyższe, tym wyższa jest wydajność prądowa. Dla odcieków A o stężeniu jonów chlorkowych – 3598 mg/l, wydajność prądowa usuwania jonów amonowych wynosiła dla gęstości prądu 3 A/dm² – 30%, natomiast dla odcieków C, w których stężenie jonów Cl⁻ było wyższe – 4626 mg/l, przy zastosowaniu gęstości prądu 3 A/dm², wydajność usuwania jonów amonowych była wyższa i wynosiła 34,9%. Wydajność prądowa procesu usuwania jonów amonowych zależy również od ich stężenia, im jest ono wyższe, tym wyższa jest wydajność. Dla odcieków E o stężeniu jonów amonowych równym 698 mg/l, przy gęstości prądu 3 A/dm², wydajność prądowa ich usuwania wynosiła 42,2%, natomiast dla odcieków D o stężeniu jonów amonowych 399 mg/l była niższa – (33,7%).

Równoległe z badaniami nad elektrotlenianiem jonów amonowych podczas procesu elektrolizy, prowadzono badania dotyczące zmian wartości ChZT. Badania prowadzone były dla wszystkich wytypowanych anod oraz próbek odcieków.

Przebieg zmian wartości wskaźnika ChZT w zależności od czasu trwania procesu dla wszystkich odcieków był podobny.

Na rys. 7 przedstawiono ubytek wartości ChZT dla odcieków A podczas procesu elektrolizy, prowadzonego z anodą SPR, tylko do czasu pełnego usunięcia jonów amonowych.

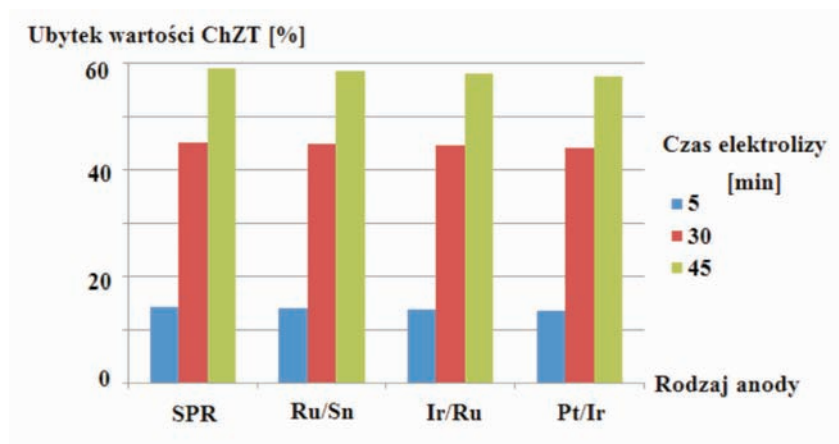


Rys. 7. Zmiany wartości ChZT podczas elektrolizy odcieków A przy gęstości prądu 2, 3, 4 A/dm² dla anody SPR

Źródło: [4].

Podobnie jak w przypadku usuwania jonów amonowych, wykresy dotyczące zmiany wartości ChZT dla poszczególnych próbek odcieków i wszystkich anod, miały podobny charakter, a czas procesu odpowiadał w każdym przypadku czasowi, po którym następowało całkowite usunięcie jonów amonowych. Odnotowany ubytek wartości ChZT wyniósł dla każdej z anod i dla gęstości prądu 2 A/dm² kolejno w szeregu: SPR[66,6] > Ru/Sn [66,5] > Ir/Ru [66,0] < Pt/Ir [65,8].

Na rys. 8 przedstawiono procentowy ubytek wartości ChZT, po jednakowych czasach elektrolizy dla wszystkich anod.



Rys. 8. Ubytek wartości ChZT, wyrażony w %, dla wybranych anod, dla odcieków A, przy gęstości prądu 3 A/dm^2

Źródło: [4].

Zmiany wartości ChZT wskazują, że dla danego czasu elektrolizy spadek wartości ChZT rósł wraz ze wzrostem gęstości prądu. Największy spadek wartości ChZT, po czasie pełnego usunięcia jonów amonowych, widoczny był w procesie trwającym najdłużej, przy gęstości 2 A/dm^2 .

Dla danego czasu elektrolizy, spadek wartości ChZT rósł wraz ze wzrostem gęstości prądu. Odnotowano niewielkie różnice tego spadku między poszczególnymi anodami. Największy spadek wartości ChZT, po czasie pełnego usunięcia jonów amonowych, widoczny był w procesie trwającym najdłużej, przy gęstości 2 A/dm^2 . Przy wszystkich gęstościach prądu dla wszystkich anod, po czasach odpowiadających całkowitemu zanikowi jonów amonowych (po wykonaniu kilku serii badań), tj. odpowiednio: 191 min, 192 min, 194 min, 195 min, spadek wartości ChZT [% ubytku], malał w szeregu:

- dla gęstości prądu 2 A/dm^2 : SPR [66,6%], > Ru/Sn [66,5%], > Ir/Ru [66,0%], > Pt/Ir [64,3%],
- dla gęstości prądu 3 A/dm^2 : SPR [61,4%], > Ru/Sn [61,3%], > Ir/Ru [61,1%], > Pt/Ir [61,0%].

Podobnie jak w przypadku jonów amonowych, porównano procentowe wartości ubytku ChZT, otrzymane podczas elektrolizy z zastosowaniem każdej anody, po takich samych czasach trwania procesu. Dla gęstości prądu 2 A/dm^2 spadek wartości ChZT, wyniósł:

- po 15 min: SPR [23,7], Ru/Sn [23,1], Ir/Ru [22,8], Pt/Ir [22,4],
- po 30 min: SPR [38,3], Ru/Sn [37,9], Ir/Ru [37,6], Pt/Ir [37,1],
- po 75 min: SPR [62,0], Ru/Sn [61,1], Ir/Ru [60,9], Pt/Ir [60,7].

Natomiast dla gęstości prądu 3 A/dm^2 wartość ChZT wynosiła:

- po 15 min: SPR [31,4], Ru/Sn [30,8], Ir/Ru [30,5], Pt/Ir [30,1],
- po 45 min: SPR [59,0], Ru/Sn [58,6], Ir/Ru [58,3], Pt/Ir [58,0].

Przy gęstości prądu 3 A/dm^2 , dla której otrzymano maksymalną wydajność prądową usuwania jonów amonowych, wydajność prądowa usuwania ChZT dla odcieków A wyniosła 70,7%.

Tak jak w przypadku jonów amonowych, na wydajność prądową usuwania ChZT miało również wpływ stężenie jonów chlorkowych. Im stężenie to było wyższe, tym większa była wydajność. Wydajność prądowa zależna była od wydajności wydzielania się chloru na anodzie. Ponadto wzrost wydajności wydzielania się chloru zwiększał efektywność procesów z jego udziałem, tj. procesów utleniania jonów amonowych i związków organicznych. Dla odcieków C, o stężeniu jonów chlorkowych – 4625 mg/l, przy gęstości prądu 3 A/dm^2 , wydajność prądowa usuwania ChZT wynosiła 64,8%, natomiast dla odcieków D (5850 mg/l Cl_2) była większa i wynosiła 87,3%.

Wydajność prądowa ubytku ChZT rosła również wraz ze wzrostem tej wartości. Dla gęstości prądu 3 A/dm^2 podczas elektrolizy odcieków A, dla których wartość ChZT wynosiła 3919 mg/l O_2 , wydajność prądowa usuwania ChZT wyniosła 70,7%. Jednak dla odcieków B o wartości ChZT 3012 mg/l O_2 i podobnym stężeniu jonów chlorkowych i amonowych wydajność była mniejsza – 55,2%.

Na wydajność prądową usuwania ChZT miało również wpływ stężenie reagentów konkurujących w reakcji utleniania, tj. jonów amonowych. Im wyższe było ich stężenie, tym wydajność była niższa. W odciekach C o stężeniu jonów amonowych 426 mg/l, przy zastosowaniu gęstości prądu 3 A/dm^2 , wydajność prądowa usuwania ChZT wynosiła 64,8%, natomiast w odciekach E o wyższym stężeniu jonów amonowych – 698 mg/l i podobnym stężeniu jonów chlorkowych, wydajność była mniejsza i wynosiła 59,2%. Dla wszystkich próbek odcieków sumaryczna wydajność prądowa jest wysoka, a dla odcieków charakteryzujących się większym stężeniem jonów chlorkowych i utlenianych zanieczyszczeń (D, E) wydajność ta przekracza 100%. Dowodzi to znacznego udziału wtórnych reakcji utleniania zanieczyszczeń, w których uczestniczą chloraminy. Ich reakcje z zanieczyszczeniami organicznymi powodują zmniejszenie wartości ChZT, zwiększając tym samym pozorną wydajność prądową procesu. Reakcje te powodują szybszy zanik chloramin, przez co zmniejsza się szybkość ubytku jonów amonowych.

Stężenie jonów chlorkowych potrzebnych do całkowitego usunięcia jonów amonowych jest wówczas mniejsze niż wynika to z reakcji pomiędzy tymi jonami, zmniejsza się więc wydajność usuwania jonów amonowych. Jednocześnie, jak to wynika z reakcji podstawienia chloru do grupy aminowej, zachodzącej łatwo za pomocą chloramin, przebiegającej zgodnie z reakcją:

$$\text{H}_3\text{NCl}^+ + \text{H}_2\text{NR} \rightarrow (\text{H}_3\text{NClH}_2\text{NR})^+ \rightarrow \text{NH}_3 + \text{RH}_2\text{NCl}^+ \rightarrow \text{RHNCI} + \text{H}^+ \quad (1)$$
następuje „regeneracja” amoniaku. Jest to również przyczyną spadku wydajności jego usuwania.

Wraz ze wzrostem gęstości prądu, w czasie, w którym następowało pełne usunięcie jonów amonowych, towarzyszący temu spadek wartości ChZT nieznacznie malał. Jest to najprawdopodobniej związane z tym, że chlor znacznie szybciej reaguje z amoniakiem i białkami znajdującymi się w odciekach, podstawiając się do grupy aminowej niż z innymi zanieczyszczeniami organicznymi, podstawiając się do łańcucha węglowodorowego.

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań nad pośrednim elektrotlenianiem anodowym zanieczyszczeń z odcieków ze składowiska odpadów komunalnych, pochodzących z Łubnej. Wszystkie próbki odcieków surowych charakteryzowały się wysokim stężeniem jonów chlorkowych, jonów amonowych i związków organicznych. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań wskazują, że:

1. Wśród wytypowanych anod najbardziej efektywną okazała się anoda SPR. Efektywność anod była bardzo zbliżona, zarówno w usuwaniu jonów amonowych, jak i zanieczyszczeń organicznych, mierzona ubytkiem stężenia jonów amonowych i wartości ChZT, dla 90% badań, malała ona w szeregu:
 $SPR > Ru/Sn > Ir/Ru > Pt/Ir$.
2. Podczas elektrolizy zgodnie z oczekiwaniami większa gęstość prądu zapewniała w określonym czasie większy spadek wartości stężenia jonów amonowych. Gęstość prądu, przy której otrzymano maksymalną wydajność anodową wynosiła 3 A/dm^2 . Sporadycznie występowała ona przy 2 i 4 A/dm^2 .
3. Na maksymalną wydajność prądową usuwania jonów amonowych wpływ miało stężenie związków organicznych. Dla odcieków o większych wartościach ChZT wydajności prądowe przy gęstościach 3 i 4 A/dm^2 były do siebie zbliżone i przewyższały wartości uzyskiwane przy gęstości 2 A/dm^2 . Dla odcieków o niższych wartościach ChZT i znacznych stężeniach jonów chlorkowych wydajność uzyskana przy 2 A/dm^2 była tylko nieznacznie niższa niż otrzymana przy 3 A/dm^2 , jednak wyższa niż wydajność uzyskana przy 4 A/dm^2 .
4. Uzyskane wyniki badań świadczą, iż gęstość prądu, zapewniająca maksymalną wydajność prądową procesu elektrotleniania jonów amonowych, przesuwa się w kierunku większych jej wartości wraz ze wzrostem stężenia zanieczyszczeń organicznych ulegających elektrotlenianiu.
Wydajność procesu usuwania jonów amonowych i zanieczyszczeń organicznych zależy od ich stężenia. Przy większym stężeniu zanieczyszczeń większa jest wydajność prądowa ich usuwania.
Wydajność procesu usuwania danego zanieczyszczenia zależy od stężenia zanieczyszczeń konkurujących w procesie utleniania. Wyższe stężenie zanieczyszczeń konkurujących powoduje obniżenie wydajności procesu.

5. Biorąc pod uwagę wysoki stopień usuwania azotu amonowego, który w procesie oczyszczania odcieków pozwala ominąć etap nitryfikacji i denitryfikacji, jak również znaczny spadek stężenia zanieczyszczeń organicznych, mierzony spadkiem wartości ChZT, można uznać, iż elektrotlenianie można zaliczyć do wysokoefektywnych metod oczyszczania odcieków. Konieczne jest jednak przeprowadzenie badań laboratoryjnych, które pozwolą na dobór najbardziej efektywnej anody i optymalnych parametrów procesu w zależności od składu odcieków.

Literatura

- [1] Chiang L-Ch., Chang J-E., Tseng S-Ch.: *Water Science Technology* 36 (1997) 123–130.
- [2] Cossu R., Haarstad K., Lavagnolo M.C., Littarru P.: *Ecological Engineering* 16 (2001) 459–470.
- [3] Deng Y., Englehardt J.D.: *Waste Management*, 27 (2007), 380–388.
- [4] Dmochowska A.: *Rozprawa doktorska*. Wydawnictwa PW, Warszawa, 2010.
- [5] Loukidou M.X., Zouboulis A.I.: *Environmental Pollution* 111 (2001) 273–281.
- [6] Prengle H.W., Symons J.M., Belthateche D.: *Waste Management* 16 (2006) 327–333.
- [7] Vlyssides A.G., Karlis P.K., Mahnken G.: *Journal of Applied Electrochemistry* 33 (2003) 155–159.
- [8] Vlyssides A.G., Karlis P.K., Rori N.: *Zorpas*, *Journal of Hazardous Materials* B95 (2002) 215–226.
- [9] Wang P., Lau W. C., Fang H.P.: *Environmental Technology* 22 (2001) 373–381.
- [10] Wang F., Smith D.W., El-Din M.G.: *Water Research* 40 (2006) 463–474.

Anna DMOCHOWSKA
Dariusz DMOCHOWSKI

The Examination of the Effectiveness of Selected Anode in Electrooxidation Process, Measured Loss of Ammonia and Organic Impurities from Leaching During the Electrolysis from Municipal Landfill

The process of electrochemical oxidation is a promising method of treatment of leachate from municipal landfills. In the tests there was used the indirect electrooxidation of the anode which is different from the direct one in the way that the impurities do not adsorb and oxidize the surface of the anode but they are oxidized only in a solution, where there is an oxidant. The effectiveness of selected anode Pt/Ir, Ru/Sn, Ir/Sn, Sn/Pb/Ru was measured by the amount of removed ammonia and by a decrease in COD values. From the selected anodes the most effective one was the Sn/Pb/Ru called SPR. The electrolytic process has completely removed the leaching color as well as it significantly reduced the COD and totally removed the ammonia. It may result in the omission of nitrification and denitrification step in the further effluent treatment process.

Keywords: impurities in leaching from municipal landfill, electrochemical treatment of leachate, indirect electrooxidation of the anode.

SUMMARY