

УДК 628.161.2: 628.31: 628.16.094:621.359.7

Гомеля М.Д.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Петриченко А.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Шаблій Т.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ АМОНІЮ З ВОДИ ЕЛЕКТРОЛІЗОМ**

У статті досліджено процеси електрохімічного окислення іонів амонію у двокамерному електролізері. Проведено оцінювання ефективності процесу залежно від складу вихідного розчину та катодної щільності струму й часу електролізу. Показано, що хлориди в аноліті навіть у незначних концентраціях каталізують процеси окислення амонію. Водночас підвищення концентрації сульфатів у розчині призводить до сповільнення деструкції аміаку. При цьому спостерігається збільшення витрат електроенергії.

Ключові слова: іони амонію, електроліз, анодне окислення, окислювально-відновлювальні процеси, вихід речовини за струмом, питома електропровідність.

Постановка проблеми. У природних водах сполуки азоту представлені іонами амонію, нітритами та нітрагами. Їх наявність у водах зумовлена розкладанням органічних речовин тваринного й рослинного походження. Крім того, іони амонію потрапляють у природні води з промисловими стоками.

У ДСанПіН 2.2.4-171-10 [1] для водопровідної води встановлено, що вміст амонію не повинен перевищувати 0,5 мг/дм³.

Всесвітня організація охорони здоров'я вміст амонію в питній воді не нормує, так як не визначено шкідливого впливу цього іону на здоров'я людини. Проте зазначається, що при його концентраціях, більших за 1,5 мг/дм³, спостерігається погіршення запаху води, а при концентраціях, більших за 35 мг/дм³, – погіршення смаку води.

Стандартами США вміст амонію в питній воді також не нормується. Але для країн ЄС концентрація іонів амонію в питній воді не повинна перевищувати 0,5 мг/дм³.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На тепер найчастіше для вилучення іонів амонію з води застосовують реагентні [2, с. 881; 3, с. 395; 4, с. 116; 5, с. 413; 6, с. 297; 7, с. 2741; 8, с. 1; 9, с. 463], сорбційні [10, с. 115; 11, с. 380; 12, с. 93], іонообмінні [13, с. 351; 14, с. 264] та біологічні [15, с. 667; 16, с. 165; 17, с. 308; 18, с. 840; 19, с. 144] методи. Усі ці методи мають переваги та недоліки.

Наприклад, біологічні методи добре себе зарекомендували під час очищення стічних вод при певних концентраціях необхідних біогенних речовин і мікроелементів. Проте для очищення природних вод, які містять незначні концентрації амонію, ці методи складно застосовувати. Крім того, біологічні методи вимагають тривалого часу обробки.

Реагентні методи ефективні лише при очищенні стічних вод, які характеризуються високими концентраціями амонію. Проте цей процес супроводжується значними витратами реагентів і, відповідно, вторинним забрудненням води.

Для вилучення іонів амонію з природних вод краще використовувати іонний обмін. Проте під час очищення природних вод, що містять у значних концентраціях іони жорсткості, за умови, що їх повне пом'якшення не потрібно, іонообмінне очищення води від амоній-іонів неефективне.

Застосування сорбційних методів з використанням природних сорбентів також має низку обмежень, а саме: дуже повільний процес, велика тривалість контакту води із сорбентом, мала сорбційна ємність при низьких концентраціях амонію у воді, малоефективне очищення в динамічних умовах.

У разі використання електродіалізу або зворотного осмосу [20] виникають проблеми з утилізацією утворених концентратів.

Зміна концентрації іонів NH_4^+ та рН в аноліті двокамерного електролізера (мембрана МА-41) від часу електролізу NH_4Cl у розчині водопровідної води та концентрації луку в католіті 50 мг-екв/дм³ (0,05 Н) (щільності струму 431 А/м²)

№ з/п	Час, τ, хв.	Аноліт		рН	Сила струму, I, А	Напруга, U, В	Вихід за струмом, В, %
		[Cl ⁻], мг/дм ³	[NH ₄ ⁺], мг/дм ³				
1	0	100	50,0	5,6	–	–	–
2	30		8,0	2,0	0,5	40	5,56
3	60		0,0	2,0	0,5	30	3,31
4	80		0,0	3,0	0,5	50	0,00
1	0	2088	1000,0	5,4	–	–	–
2	30		590,0	2,0	0,5	14	54,30
3	60		175,0	2,0	0,5	15	54,63
4	90		8,6	2,0	0,5	26	43,76
5	120		0,0	2,0	0,5	45	33,11

На основі аналізу наукових публікацій останніми роками встановлено, що справді ефективних методів видалення іонів амонію з води є дуже мало.

Серед перспективних сучасних методів видалення амонію з води є електрохімічний метод. Застосування електрохімічних методів призводить до вилучення сполук азоту [21, с. 17] з використанням емнісної деіонізації, при якій амоній виділяється з води та концентрується завдяки різниці концентрацій між електродними камерами й робочою камерою. Проте невивченими залишаються процеси електрохімічного окислення амонію. Тому дослідження, проведені в роботі, є вчасними й актуальними.

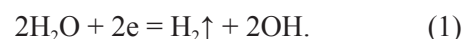
Постановка завдання. Метою роботи є дослідження процесів електрохімічного окислення амонію в двокамерному електролізері залежно від складу вихідного розчину та концентрації луку в католіті, часу електролізу, щільності струму.

Виклад основного матеріалу дослідження. Першим етапом роботи є визначення ефективності очищення води від амонію в двокамерному електролізері, в якому катодна та анодна ділянки розділені аніонною мембраною МА-41. Для цього використовували розчини хлориду амонію з концентраціями по амонію 50 та 1000 мг/дм³. При цьому концентрація хлоридів в аноліті сягала 100 та 2088 мг/дм³ (таблиця 1). У катодній камері розміщували 0,1 Н розчин луку. Щільність струму становила близько 431 А/м² (I=0,5 А). Напруга в менш концентрованому розчині коливалась у межах 30–50 В, а в більш концентрованому – 14–45 В. Це пов'язано зі зниженням електропровідності в менш концентрованих розчинах.

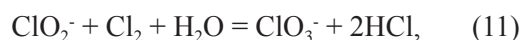
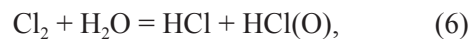
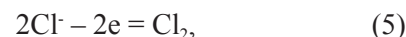
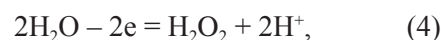
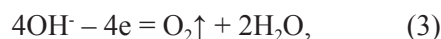
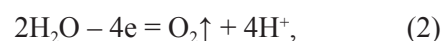
Як видно з таблиці 1, при концентраціях 100 та 2088 мг/дм³ досягнуто повне очищення води від іонів амонію. Зменшення концентрації іонів

амонію відбувалось за рахунок окислення азоту в молекулах аміаку киснем, перекисними сполуками, сполуками окисленого хлору, які утворюються на аноді. Вихід за струмом по окисленому азоту в більш концентрованому розчині майже на порядок вищий, ніж у розведеному розчині. Це пов'язано зі зниженням виходу по окисленому азоту в розведеному розчині та витратами енергії на синтез значного надлишку окислювальних агентів на аноді.

У двокамерному електролізері можливе проходження окислювально-відновних реакцій. На катоді головним чином відбувається утворення водню та гідроксид аніонів під час відновлення води:



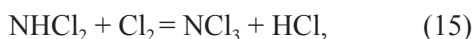
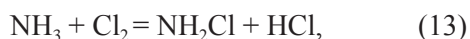
На аноді можливе утворення таких сполук:



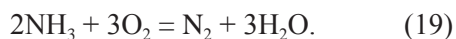
У лужному або нейтральному середовищі проходять в основному реакції 1–4, а в нейтральному, кислому та слабокислому середовищі краще

проходять реакції 5–11, хоча утворення ClO^- , ClO_2^- та ClO_3^- краще проходить у слаболужному середовищі (реакції 7, 9, 12).

З огляду на те, що рН середовища в аноліті змінювався в межах 5,6–2,0, можна сказати, що основними окисниками були кисень, пероксидні сполуки, активний хлор і, можливо, гіпохлорид аніон. Імовірно у цьому випадку було утворення хлорамінів за реакціями 13–18:



Судячи з рН середовища, ймовірно, відбуваються процеси, описані реакціями 13–18. Проте в проведених дослідях не відмічалось суттєвого підвищення концентрації активного хлору, що повинно було б відбуватися в разі отримання переважно хлорамінів. Концентрацію активного хлору визначали за зниженням концентрацій сульфату натрію при змішуванні з анолітом або за виділенням йоду під час обробки аноліту розчином йодиду калію. Імовірно, в цьому випадку аміак окислюється до азоту сполуками кисню, а активний хлор видаляється з розчину в результаті дегазації:



На першому етапі під час проведення електролізу розчинів хлориду амонію вміст хлоридів не контролювали (таблиця 1), тому складно визначити їх вплив на процеси окислення аміаку. Проте в подальших дослідженнях (рис. 1) при електролізі розчинів хлориду амонію (10–50 мг/дм³ по амонію) в аноліті контролювали як залишковий вміст амонію, так і концентрацію хлоридів.

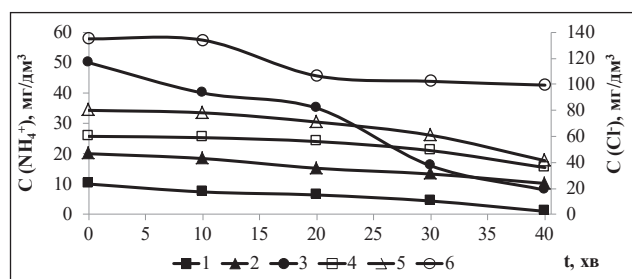


Рис. 1. Залежність концентрації іонів амонію (1, 2, 3) та хлорид-іонів (4, 5, 6) в аноліті двокамерного електролізера (мембрана МА-41) від часу електролізу при щільності струму 86,2 А/м² та вихідних концентрацій амонію і хлоридів відповідно, мг/дм³: 10, 60 (1, 4); 20, 80 (2, 5); 50, 135 (3, 6)

Як видно з рис. 1, при густині струму 86,2 А/м² за 40 хвилин електролізу відмічено суттєве зниження концентрації іонів амонію у воді. Одночасно вміст хлоридів у воді знизився на 30–50 мг/дм³. Очевидно, що утворений активний хлор частково призводив до окислення аміаку, а частково у вигляді Cl_2 та ClO_2 видалявся з розчину в результаті дегазації.

Аналізуючи отримані результати (рис. 1), варто відзначити, що за таких умов вміст хлоридів у мольному відношенні знижується повільніше, ніж концентрація аміаку. Це можна пояснити окисленням іонів амонію утвореними в результаті електролізу киснем і перекисними сполуками, а також частковим переходом окислених сполук хлору в хлориди в разі окислення аміаку.

Необхідно відмітити, що з підвищенням вихідної концентрації амонію у воді з 10 до 50 мг/дм³ інтенсивність окислення іонів амонію зростає. Так, при початковій концентрації 10 мг/дм³ за 40 хвилин електролізу вміст амонію знизився на 9 мг/дм³ (до 1 мг/дм³). За тих самих умов (об'єм розчину, щільність струму, час електролізу) в розчині з вихідною концентрацією амонію 50 мг/дм³ його вміст знизився на 42 мг/дм³ (до 8 мг/дм³).

Це свідчить про те, що в першому випадку (10 мг/дм³) енергія головним чином витрачалась на побічні процеси – окислення хлоридів, електроліз води, нагрівання розчинів тощо, а в другому випадку (50 мг/дм³) основна частина енергії витрачалась саме на окислення аміаку. Це підтверджується й виходом за струмом окисленого аміаку (рис. 2), і витратою електроенергії (таблиця 2). Якщо при вихідній концентрації амонію 50 мг/дм³ швидкість його окислення була більше як у 4 рази вищою, ніж швидкість окислення при початковій концентрації 10 мг/дм³, то й вихід за струмом був вищий у 4–5 разів при концентрації амонію 50 мг/дм³ порівняно з концентрацією 10 мг/дм³. Відмічалось також і зниження енерговитрат на окислення амонію в 4–6 разів при підвищенні його концентрації з 10 до 50 мг/дм³ (таблиця 2).

Виходячи з результатів, представлених у таблиці 1 і на рис. 2, варто відзначити, що при концентрації іонів амонію у воді на рівні 10–50 мг/дм³ значно знизився вихід за струмом по окисленому азоту (рис. 2) порівняно з концентрованим розчином хлориду амонію (таблиця 1), хоча за концентрації іонів амонію 50 мг/дм³ при щільності струму 86,2 А/м² вихід за струмом значно вищий (15–22%) порівняно з виходом за струмом при щільності струму 431 А/м² (3–5%).

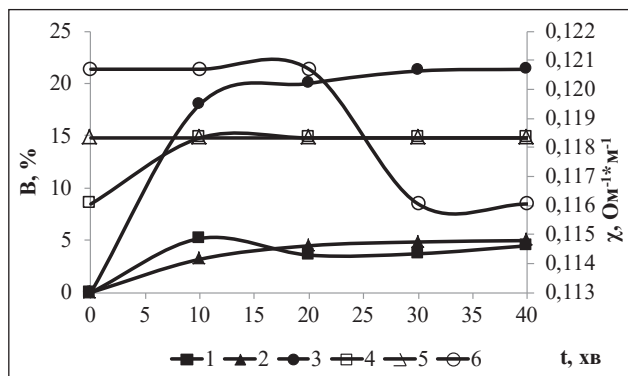


Рис. 2. Залежність виходу за струмом при окисленні амонію (1, 2, 3) та питомої електропровідності (4, 5, 6) у двокамерному електролізері (мембрана МА-41) від часу електролізу при щільності струму 86,2 А/м² та вихідних концентрацій амонію і хлоридів відповідно, мг/дм³: 10, 60 (1, 4); 20, 80 (2, 5); 50, 135 (3, 6)

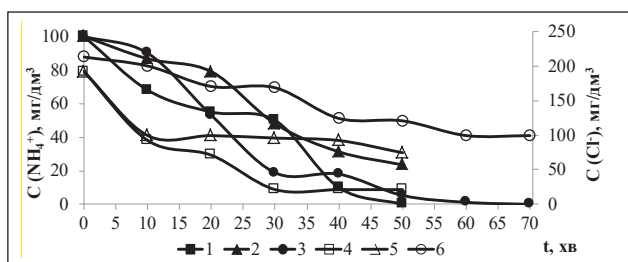


Рис. 3. Залежність концентрації амонію (1, 2, 3) та хлорид-іонів (4, 5, 6) в аноліті двокамерного електролізера (мембрана МА-41) від часу електролізу при щільності струму 172,4 А/м², фіксованої вихідної концентрації амонію 100 мг/дм³ та змінних концентрацій сульфатів у розчині, мг/дм³: 16 (1, 4), 84 (2, 5), 150 (3, 6)

При вихідній концентрації амонію 100 мг/дм³ (рис. 3) спостерігалась досить висока інтенсивність його окислення. За 40 хвилин процесу при густині струму 172,4 А/м² вміст іонів амонію зменшився на 90 мг/дм³. Повністю амоній видалився з води за 50 хвилин. За цих вихідних умов вихід за струмом сягав 16–32% (рис. 4). Це значно вище, ніж при концентрації амонію 10 мг/дм³. Отже, необхідно відмітити, що в разі підвищення

концентрації амонію у воді в 10 разів швидкість його окислення та вихід за струмом зростають приблизно в стільки ж разів (рис. 1–4).

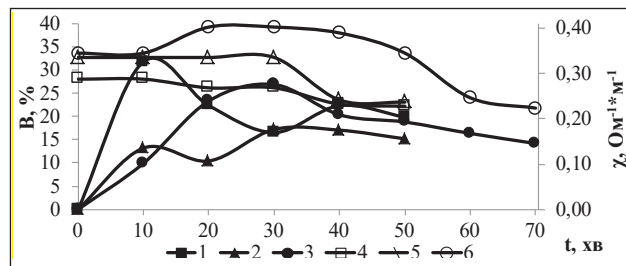


Рис. 4. Залежність виходу за струмом при окисленні амонію (1, 2, 3) та питомої електропровідності (4, 5, 6) у двокамерному електролізері (мембрана МА-41) від часу електролізу при щільності струму 172,4 А/м², фіксованої вихідної концентрації амонію 100 мг/дм³ та змінних концентрацій сульфатів у розчині, мг/дм³: 16 (1, 4), 84 (2, 5), 150 (3, 6)

У разі наявності у воді сульфатів відмічається, що при збільшенні до певної міри концентрації сульфатів в аноліті зростає й електропровідність (рис. 4). Проте швидкість окислення амонію та вихід за струмом окисленого амонію знижуються (рис. 3, 4), тоді як витрата електроенергії дещо зростає (таблиця 2). При вихідних концентраціях амонію у воді на рівні 5–10 мг/дм³ вихід за струмом є зовсім низьким (таблиця 3).

Як видно з таблиці, при проведенні електролізу у водопровідній воді, яка містить хлориди в концентраціях 19–59 мг/дм³, за наявності у воді сульфатів у концентраціях 100–300 мг/дм³ або хлоридів у концентрації 170 мг/дм³ іони амонію окислювались повністю за 10–20 хвилин при силі струму 0,2А (J=172,4 А/м²). Вихід за струмом сягав 8,44% ($[\text{NH}_4^+]_{\text{поч}}=10$ мг/дм³) та 4,97% ($[\text{NH}_4^+]_{\text{поч}}=5$ мг/дм³). Відмічено, що за цих умов підвищення концентрації сульфат-іонів у розчині не впливало на ефективність окислення амонію, а також не сприяло суттєвому підвищенню елек-

Таблиця 2

Вплив складу розчину та часу електролізу на витрату електроенергії на окислення амонію в розчині хлориду амонію

t, хв.	Витрата електроенергії, кВт·год/г-екв					
	$[\text{NH}_4^+]/[\text{Cl}^-]$, мг/дм³			$[\text{NH}_4^+]/[\text{Cl}^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$, мг/дм³		
	10/60	20/80	50/135	100/209/16	100/209/84	100/209/150
10	26,47	43,01	6,75	3,54	7,30	9,44
20	38,23	30,58	8,99	5,40	9,25	3,44
30	36,86	28,28	6,58	7,29	5,60	2,99
40	30,58	27,52	6,53	6,24	7,86	4,08
50				7,15	8,99	4,99
60						8,03
70						10,20

Зміна концентрацій амонію, хлоридів, активного хлору та рН в аноліті двокамерного електролізера (мембрана МА-41) від часу електролізу хлориду амонію в розчині водопровідної води з наявності в аноліті хлоридів (I) і сульфатів (II, III, IV) ($[\text{NaOH}] = 200 \text{ мг-екв/дм}^3$ в католіті)

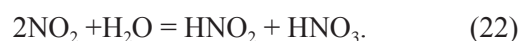
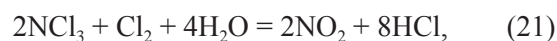
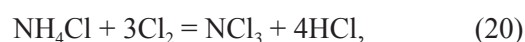
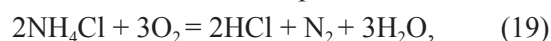
№	з/п	Час, хв.	Концентрація в аноліті, мг/дм ³ / мг-екв/дм ³				рН	I, А	U, В	В, %
			SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Cl ₂				
I	1	0	-	170,0	10,0	0,0/0,0	7,6	-	-	-
	2	0		170,0	1,5	96,0/2,7	6,0	0,2	52	8,44
	3	20		127,8	0,0	177,5/5,0	6,0	0,2	53	4,97
	4	35		106,5	0,0	255,6/7,2	5,0	0,2	51	0,00
	5	50		78,1	0,0	301,8/8,5	5,0	0,1	51	0,00
	6	65		53,3	0,0	284,0/8,0	5,0	0,1	53	0,00
II	1	0	100	59,0	5,0	0,0/0,0	8,0	-	-	-
	2	5		17,0	0,0	95,9/2,7	7,0	0,2	55	3,31
	3	30		14,2	0,0	177,5/5,0	7,0	0,1	51	0,00
	4	45		8,9	0,0	255,6/7,2	7,0	0,1	55	0,00
III	1	0	200	19,0	5,0	0,0/0,0	8,1	-	-	-
	2	15		14,2	0,0	18,5/0,52	7,0	0,2	52,5	3,31
	3	30		12,0	0,0	23,4/0,66	7,0	0,2	43,0	0,00
	4	45		4,8	0,0	35,5/1,00	7,0	0,2	52,5	0,00
IV	1	0	300	49,0	5,0	0,0/0,0	7,6	-	-	-
	2	10		42,6	0,0	60,4/1,7	7,0	0,2	52,0	4,97
	3	20		35,5	0,0	63,9/1,8	7,0	0,2	51,0	0,00
	4	35		42,6	0,0	67,5/1,9	7,0	0,2	51,0	0,00
	5	45		43,3	0,0	78,1/2,2	7,0	0,2	50,0	0,00
	6	55		28,4	0,0	117,2/3,3	7,0	0,0	52,0	0,00

тропроводності системи. Імовірно, це пов'язано із суттєвим зростанням умісту активного хлору (окислених сполук хлору) в аноліті, що призвело до втрати електропроводності мембрани.

У всіх дослідах уміст активного хлору зростає із часом електролізу та значно перевищував еквівалентну кількість окислених хлоридів. Це пояснюється утворенням разом із Cl₂ інших окислених сполук хлору, таких як ClO⁻, ClO₂⁻, ClO₂, ClO₃⁻. Саме цим пояснюється аномально високий уміст активного хлору в розчині й низький вихід за струмом при окисленні амонію.

У всіх випадках при анодному окисленні амонію відбувалось підкислення аноліту. Хоча, якщо врахувати, що католітом був розчин лугу та під час проведення електролізу відбувалась постійна дифузія гідроксиду аніонів із катодної ділянки, видається дивним суттєве зниження рН в аноліті. Адже на кожен молекулу активного хлору, що утворюється на аноді (реакція 5), утворювались дві гідроксидні групи на катоді, які через аніонну мембрану потрапляли в анодну ділянку. За реакцією 2 відбувалось утворення протонів в еквівалентній кількості гідроксид-аніонам у католіті. Лише в разі використання хлориду амонію в розчині водо-

проводної води за концентрації амонію всього 5 мг/дм³ та концентрації хлориду й сульфату натрію 150–450 мг/дм³ підкислення розчину було незначним. В інших випадках спостерігалось зниження рН з 5,6 до 2,0 (таблиця 1), що зумовлено окисленням амонію до діоксиду азоту з утворенням азотної кислоти за схемою, описаною реакціями 19–22:



Імовірно, кислотність розчину при цьому могла суттєво зростати, а рН падати значно нижче за 2. Проте варто врахувати, що в разі підкислення розчину з нього видаляються внаслідок дегазації Cl₂ та ClO₂ (реакції 5 та 10), хлористий водень та окисли азоту. Унаслідок установаження динамічної рівноваги між згаданими процесами рН середовища сягає 2.

Висновки. У результаті проведених досліджень установлено, що навіть незначний уміст хлорид-іонів в аноліті каталізує процес окислення амонію. Водночас зростання концентрації сульфа-

тів дещо сповільнює деструкцію аміаку, що збільшує витрату електроенергії. З огляду на суттєвий вплив хлоридів на процеси окислення амонію у воді, виникають певні сумніви щодо застосування

цього методу в разі малих концентрацій хлоридів. Тому в подальшому передбачається проведення дослідження щодо використання сульфату амонію.

Список літератури:

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Київ, 2010. 25 с.
2. Zhang Tao, Qiucheng Li, Lili Ding, Hongqiang Ren, Ke Xu, Yonggang Wu, Dong Sheng. Modeling assessment for ammonium nitrogen recovery from wastewater by chemical precipitation. *Journal of Environmental Sciences*. 2011. V. 23. № 6. P. 881–890.
3. Yun-nen Chen, Chun-hua Liu, Jin-xia Nie. Chemical precipitation and biosorption treating landfill leachate to remove ammonium-nitrogen. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2013. V. 15. № 2. P. 395–399.
4. Patel Ishanee A., Hemangi H. Desai. Ammonium Removal from Landfill Leachate by Chemical Precipitation. *International Journal of Innovative Research and Development*. 2014. V. 3. № 7. P. 116–126.
5. Escudero A., Blanco F., Lacalle A., Pinto M. Struvite precipitation for ammonium removal from anaerobically treated effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. V. 3. № 1. P. 413–419.
6. Jia Guangan, Hu Zhang, Joerg Krampe, Tim Muster, Baoyu Gao, Nanwen Zhu, Bo Jin. Applying a chemical equilibrium model for optimizing struvite precipitation for ammonium recovery from anaerobic digester effluent. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 147. P. 297–305.
7. Haiming Huang, Xianming Xiao, Liping Yang, Bo Yan. Recovery of nitrogen from saponification wastewater by struvite precipitation. *Water Science and Technology*. 2010. V. 61. № 11. P. 2741–2748.
8. Haiming Huang, Xianming Xiao, Liping Yang, Bo Yan. Removal of ammonium as struvite using magnesite as a source of magnesium ions. *Water Practice and Technology*. 2010. V. 5. № 1. P. 1–9.
9. Tulaydan Y., Malovanyy M., Kochubei V., Sakalova H. Treatment of high-strength wastewater from ammonium and phosphate ions with the obtaining of struvite. *Chemistry and Chemical Technology*. 2017. V. 11. № 4. P. 463–468.
10. Widiastuti N., Wu H., Ang H.M., Zhang D. Removal of ammonium from greywater using natural zeolite. *Desalination*. 2011. V. 277. № 1. P. 15–23.
11. Yusof A.M., Keat L.K., Ibrahim Z., Majid Z.A., Nizam N.A. Kinetic and equilibrium studies of the removal of ammonium ions from aqueous solution by rice husk ash-synthesized zeolite Y and powdered and granulated forms of mordenite. *Journal of hazardous materials*. 2010. V. 174. № 1. P. 380–385.
12. Malovanyy A., Sakalova H., Tulaydan Y., Yatchyshyn N., Plaza E., Malovanyy M. Concentration of ammonium from municipal wastewater using ion exchange process. *Desalination*. 2013. V. 329. P. 93–102.
13. Sica M., Duta A., Teodosiu C., Draghici C. Thermodynamic and kinetic study on ammonium removal from a synthetic water solution using ion exchange resin. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2014. V. 16. № 2. P. 351–359.
14. Yingxin Zhao, Yingnan Yang, Shengjiong Yang, Qinghong Wang, Chuanping Feng, Zhenya Zhang. Adsorption of high ammonium nitrogen from wastewater using a novel ceramic adsorbent and the evaluation of the ammonium-adsorbed-ceramic as fertilizer. *Journal of colloid and interface science*. 2013. V. 393. P. 264–270.
15. Nozhevnikova A.N., Simankova M.V., Littl Y.V. Application of the microbial process of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) in biotechnological wastewater treatment. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2012. V. 48. № 8. P. 667–684.
16. Mousavi S.A., Ibrahim S., Aroua M.K. Effect of carbon source on acclimatization of nitrifying bacteria to achieve high-rate partial nitrification of wastewater with high ammonium concentration. *Applied Water Science*. 2017. V. 7. № 1. P. 165–173.
17. Han M., Zhao Z., Cui F., Gao W., Liu J., Zeng Z.Q. Pretreatment of contaminated raw water by a novel double-layer biological aerated filter for drinking water treatment. *Desalination and Water Treatment*. 2012. V. 37. № 1. P. 308–314.
18. Su Jung-Jeng, Chang Yuan-Chie, Huang Shun-Ming. Ammonium reduction from piggery wastewater using immobilized ammonium-reducing bacteria with a full-scale sequencing batch reactor on farm. *Water Science and Technology*. 2014. V. 69. № 4. P. 840–846.
19. Malovanyy A., Plaza E., Trela J., Malovanyy M. Combination of ion exchange and partial nitritation/Anammox process for ammonium removal from mainstream municipal wastewater. *Water Science and Technology*. 2014. V. 70. №1. P. 144–151.
20. Ваганов І.І., Масєвська І.В., Попович М.М. Інженерна геологія та охорона навколишнього середовища: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2014. 267 с.

21. Shiting Ren, Mengchen Li, Jianyu Sun, Yanhong Bian, Kuichang Zuo, Xiaoyuan Zhang, Peng Liang, Xia Huan. A novel electrochemical reactor for nitrogen and phosphorus recovery from domestic wastewater. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2017. V. 11. № 4. P. 17.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ АММОНИЯ ИЗ ВОДЫ ЭЛЕКТРОЛИЗОМ

В работе исследованы процессы электрохимического окисления ионов аммония в двухкамерном электролизере. Проведена оценка эффективности процесса в зависимости от состава исходного раствора и католита, плотности тока и времени электролиза. Показано, что хлориды в анолите даже в незначительных концентрациях катализируют процессы окисления аммония. В то же время повышение концентрации сульфатов в растворе приводит к замедлению деструкции аммиака. При этом наблюдается увеличение расхода электроэнергии.

Ключевые слова: ионы аммония, электролиз, анодное окисление, окислительно-восстановительные процессы, выход вещества по току, удельная электропроводность.

REMOVAL OF AMMONIUM IONS FROM WATER BY ELECTROLYSIS

In this work the processes of electrochemical oxidation of ammonium ions in a two-chamber electrolyzer are investigated. An estimation of efficiency of the process, depending on the composition of the initial solution and the catholyte, current density and time of electrolysis is carried out. It has been shown that chlorides in anolyte even catalyze the processes of ammonium oxidation, even at low concentrations. At the same time, an increase in the concentration of sulfates in the solution leads to a deceleration of ammonia destruction. At the same time there is an increase in electricity consumption.

Key words: ammonium ions, electrolysis, anodic oxidation, oxidation-reduction processes, current output, specific electrical conductivity.