

Охрана окружающей среды

УДК 628.16.081.3:628.316.12

Макаренко И.Н., канд. техн. наук, **Трус И.Н.**, канд. техн. наук,
Петриченко А.И., **Кийченко А.Ю.**

*НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев
пр. Победы, 37, корп. 4, 03056 Киев, Украина, e-mail: petalig33@gmail.com*

Исследование эффективности сорбционной очистки воды от ионов аммония на природных и искусственных сорбентах

Изучены процессы ионообменной очистки воды от ионов аммония из модельных растворов на катионитах и на цеолите. Установлены зависимости по сорбции аммония от формы ионита, соотношения аммония и кальция в воде и уровня концентраций ионов в растворе. Показано, что сильнокислотный катионит КУ-2-8 в Na^+ -форме имеет низкую селективность по ионам аммония по сравнению с H^+ -формой. Установлено, что в присутствии ионов кальция эффективность сорбции ионов аммония на катионитах КУ-2-8 и Dowex Mac-3 снижается. Определено, что регенерация катионита КУ-2-8 была более эффективной при использовании растворов соляной кислоты. Показано, что сорбция аммония на цеолите из водопроводной воды проходит так же, как и из модельных растворов. Определено, что граничная емкость цеолита по ионам аммония составляет 40 мг/г. Исследована регенерация цеолита раствором хлорида натрия. Установлено, что степень регенерации достигает 100 %. *Библ. 16, рис. 6, табл. 1.*

Ключевые слова: ионный обмен, сорбция, аммоний, кальций, регенерация, емкость сорбента, цеолит.

Глобальная проблема питьевой воды неразрывно связана с проблемой качественной очистки сточных вод и предотвращением загрязнения источников чистой пресной воды. В настоящее время одной из главных проблем в области очистки природных и сточных вод является удаление из них биогенных элементов — соединений азота и фосфора, вызывающих эвтрофикацию водных объектов [1].

Аммоний является продуктом жизнедеятельности организмов, избыток которого приводит к повышению рН среды, снижению кон-

центрации растворенного кислорода, ускоренной эвтрофикации водоема и выделению яда цианобактериями [2]. Такие воды могут вызывать аллергические кожные реакции и желудочно-кишечные расстройства у животных и людей.

Соединения аммония попадают в водоемы в результате природных и антропогенных процессов: поверхностной эрозии почв, неправильного применения минеральных удобрений, сброса стоков животноводческих комплексов, бытовых и хозяйственно-фекальных стоков [3]. В про-

цессе кругооборота азота соединения аммония постепенно подлежат нитрификации с участием микроорганизмов. В завершение кругооборота нитрит- и нитрат-ионы должны превратиться под действием бактерий-денитрификаторов в газообразные соединения N_2 или N_2O , но в результате роста масштабов использования удобрений и увеличения объемов азотсодержащих отходов различных производств стабильность природного кругооборота азота нарушается. Следствием этого является накопление в водоемах нитритов и нитратов. Иногда их концентрация может достигать токсического значения [4, 5].

Необходимость решения данной проблемы связана не только с природоохранными и рыбохозяйственными целями, но и с преодолением больших трудностей, возникающих при водоподготовке для питьевого и промышленного водоснабжения из водоемов, которые подверглись эвтрофикации. Городские очистные сооружения были построены по традиционной схеме [6] (полная биологическая очистка, в некоторых случаях с доочисткой) в то время, когда загрязнение воды биогенными элементами еще не было таким интенсивным, поэтому сейчас они не справляются с задачей очистки сточных вод от этих веществ и не обеспечивают нормативное качество воды [4].

Основными задачами современных требований к качеству очищаемой воды являются изъятие биогенных элементов и глубокая очистка воды по БПК и взвешенным веществам [6]. Анализ исследований показывает, что эффективность очистки сточных вод от биогенных соединений зависит от состава сточных вод и от принятой технологической схемы извлечения загрязнителей в процессе очистки сточных вод [7].

Постановка целей и задач научного исследования

Целью данной работы было изучение параметров сорбции и десорбции ионов аммония на природных и искусственных ионообменных материалах. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить процессы извлечения аммония из воды на цеолитах в зависимости от начальной концентрации аммония;
- изучить процессы ионообменного извлечения аммония из воды на катионитах в зависимости от состава воды и формы ионитов;
- определить влияние ионов жесткости на эффективность ионообменного извлечения аммония из воды;

– исследовать процессы десорбции аммония с катионитов для разработки эффективных методов регенерации ионообменных смол.

Методы и объекты исследования

Процессы сорбции ионов аммония из воды проводили при использовании природного цеолита, сильнокислотного катионита КУ-2-8 в Na^+ - и H^+ -форме, а также слабокислотного катионита Dowex Mac-3 в H^+ -форме. Для регенерации КУ-2-8 и перевода его в Na^+ -форму использовали 10 %-й раствор хлорида натрия, а для перевода его в H^+ -форму использовали 6-, 10- и 11 %-е растворы соляной кислоты. Для регенерации цеолита использовали 9 %-й раствор хлорида натрия.

В качестве рабочих растворов при изучении сорбции аммония в динамических условиях использовали модельные растворы NH_4Cl с концентрацией по NH_4^+ в пределах 110–1825 мг/дм³. При изучении сорбции аммония на цеолите в статических условиях использовали модельные растворы NH_4Cl с концентрацией по NH_4^+ от 5 до 1500 мг/дм³.

Сорбцию на ионитах проводили при фильтровании растворов через колонку диаметром 19 мм с расходом 10–15 см³/мин (скорость фильтрования 2–3 м/ч). Расход регенерационных растворов составлял 1–3 см³/мин (скорость фильтрования 0,2–0,6 м/ч). Объем ионита составлял 20 см³. В процессах сорбции в пробах определяли содержание аммония, кислотность, щелочность, рН, в отдельных опытах определяли остаточное содержание ионов кальция. Обменную динамическую емкость катионита рассчитывали по формуле [8], мг-экв/дм³:

$$ПОДЕ = [\sum (C_n - C_i) V_n] / V_i, \quad (1)$$

где C_n – начальная концентрация ионов в растворе, мг-экв/дм³; C_i – концентрация ионов в i -й пробе после сорбции, мг-экв/дм³; V_n – объем пробы, см³; V_i – объем ионита, см³.

Степень регенерации ионита после пропускания n -го количества проб регенерационного раствора рассчитывали как соотношение массы десорбированных и сорбированных ионов [8], мг-экв/дм³:

$$Z = [\sum (M_i^d / M_c)] \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где M_i^d – количество десорбированных ионов с i -й пробой регенерационного раствора, мг-экв/дм³; M_c – количество сорбированных ионов, мг-экв/дм³.

Граничную емкость по аммонiu на цеолите определяли по методике, описанной в работе [9], мг/г :

$$\Gamma = V_p (C_n - C_i) / m_{ц}, \quad (3)$$

где V_p — объем раствора, дм^3 ; C_n — начальная концентрация ионов в растворе, $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$; C_i — остаточная концентрация ионов в растворе, $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$; $m_{ц}$ — масса навески цеолита, г.

Результаты и обсуждение

При концентрации раствора по аммонiu $110 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ($6 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$) насыщение катионита КУ-2-8 в Na^+ -форме ионами аммония происходило достаточно медленно. При этом значение ПОДЕ составляет $1775 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$, а ОДЕ до проскока всего $550 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$, что свидетельствует о низкой селективности ионита в Na^+ -форме по ионам аммония.

Была изучена сорбция аммония на КУ-2-8 в H^+ - и Na^+ -форме при исходных концентрациях NH_4^+ , составляющих 543, 1325 и 1825 $\text{мг}/\text{дм}^3$. Быстро насыщения ионит достигал при более высоких концентрациях аммония в воде (рис.1). При начальных концентрациях аммония 543 и 1325 $\text{мг}/\text{дм}^3$ ПОДЕ катионита в H^+ -форме составило соответственно 2420 и 2230 $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$, а в Na^+ -форме — 2400 $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ при начальной концентрации 1825 $\text{мг}/\text{дм}^3$. Значение ОДЕ до проскока для КУ-2-8 в H^+ -форме возрастает с увеличением концентрации соответственно до 1550 и 1840 $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$, а в Na^+ -форме составляет 507 $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$, что подтверждает низкую селективность ионита в этой форме по NH_4^+ .

Регенерацию катионита КУ-2-8 в H^+ - и Na^+ -форме проводили 6- и 11 %-м растворами HCl , а также 10 %-м раствором NaCl (рис.2). Эффективность регенерации составляла 90 %

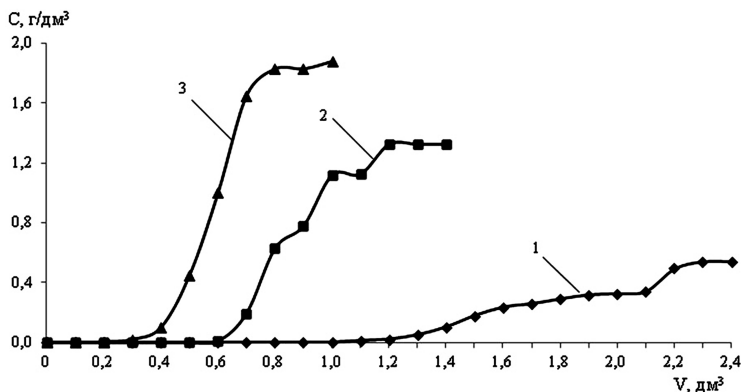


Рис.1. Зависимость концентрации ионов аммония от пропущенного объема раствора NH_4Cl в дистиллированной воде через катионит КУ-2-8 ($V_i = 20 \text{ см}^3$) в H^+ -форме (1; 2) и в Na^+ -форме (3) при исходных концентрациях $[\text{NH}_4^+]$, $\text{мг}/\text{дм}^3$: 1 — 543; 2 — 1325; 3 — 1825.

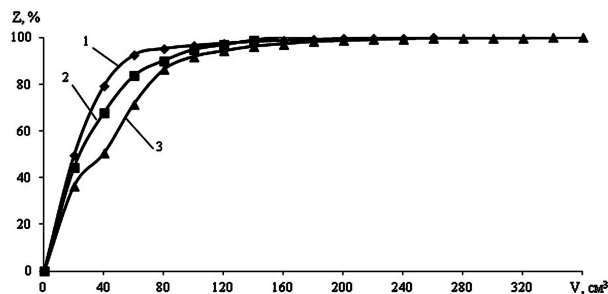


Рис.2. Зависимость степени регенерации катионита КУ-2-8 ($V_i = 20 \text{ см}^3$) в NH_4^+ -форме от объема пропущенных регенерационных растворов: 1 — 11 % HCl ; 2 — 6 % HCl ; 3 — 10 % NaCl .

при расходе регенерационного раствора 80 см^3 на 20 см^3 ионита ($q_{п} = 4 \text{ см}^3/\text{см}^3$) при концентрации соляной кислоты 6 %. При увеличении концентрации HCl до 11 % с расходом $q_{п} = 4 \text{ см}^3/\text{см}^3$ эффективность регенерации составляет 95,3 %. При таком же расходе регенерационного раствора NaCl эффективность регенерации составляет 86,3 %. Только при расходе $q_{п} = 5 \text{ см}^3/\text{см}^3$ эффективность регенерации повышается до 92 %. Из этого можно сделать вывод, что регенерация проходила лучше и быстрее при использовании растворов соляной кислоты в сравнении с растворами хлорида натрия.

Катионит КУ-2-8 в Na^+ -форме имеет низкую селективность по ионам аммония, поэтому для оценки влияния ионов жесткости на сорбцию ионов аммония было проведено исследование по извлечению аммония в H^+ -форме в присутствии ионов Ca^{2+} .

Интересно было определить возможность использования катионита Dowex Mac-3 для извлечения NH_4^+ . На рис.3 представлены исходные кривые сорбции ионов аммония из модельных растворов на катионитах КУ-2-8 в H^+ -форме, а также Dowex Mac-3 в H^+ -форме в присутствии ионов кальция при соотношении эквивалентных концентраций 1 : 1 и 1 : 3. Начальные концентрации аммония составляли 23 $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ ($414 \text{ мг}/\text{дм}^3$) для Dowex Mac-3 и 30 $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ ($540 \text{ мг}/\text{дм}^3$) для КУ-2-8.

Из рис.3 видно, что в присутствии ионов кальция сорбция ионов аммония практически не происходит, а в дальнейшем даже уже сорбированные ионы аммония вытесняются кальцием. Это подтверждается и низкими значениями ПОДЕ по всем вариантам сорбции (таблица). Еще хуже результаты по сорбции аммония были при соотношении концен-

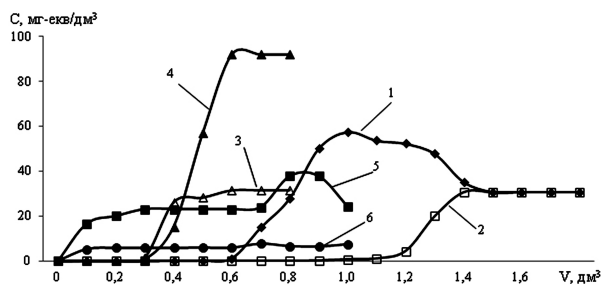


Рис.3. Зависимость концентрации ионов аммония (1, 3, 5) и кальция (2, 4, 6) от пропущенного объема модельных растворов NH₄Cl и CaCl₂ в соотношениях 1 : 1 (1; 2; 5; 6) и 1 : 3 (3; 4) через катиониты КУ-2-8 в Н⁺-форме (1; 2; 3; 4) и Dowex Мас-3 в Н⁺-форме (5; 6) (V_i = 20 см³).

траций NH₄⁺ : Ca²⁺ = 1 : 3. Такое соотношение концентраций было выбрано из-за того, что в природных водах реальное содержание кальция значительно больше, чем аммония.

Из данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что использование катионита Dowex Мас-3 для удаления аммония в присутствии ионов кальция не целесообразно.

ПОДЕ и ОДЕ катионитов в Н⁺-форме при сорбции NH₄⁺ в присутствии Ca²⁺

Показатель	Dowex Мас-3	КУ 2-8	КУ 2-8
NH ₄ ⁺ : Ca ²⁺	1 : 1	1 : 1	1 : 3
ПОДЕ [NH ₄ ⁺], мг-экв/дм ³	0,0	440,0	500,0
ПОДЕ [Ca ²⁺], мг-экв/дм ³	1250,0	1870,0	1930,0
ОДЕ [Ca ²⁺], мг-экв/дм ³	0,0	1232,0	920,0

Несмотря на в целом положительные результаты сорбции и десорбции ионов аммония на катионите КУ-2-8, данный метод не подходит для очистки природных вод от аммония при наличии в них ионов жесткости. В таких случаях целесообразнее использовать природные сорбенты, например, цеолит марки ЦПС (фракция 2,5–5,0 мм).

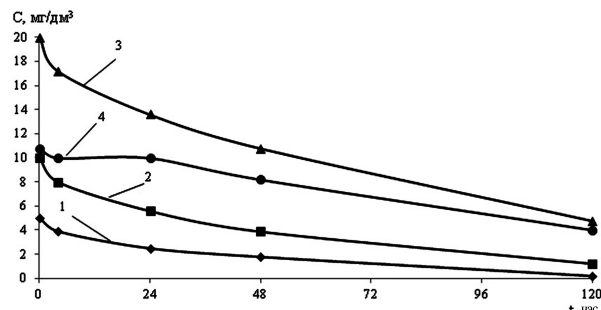


Рис.4. Зависимость остаточной концентрации аммония от времени сорбции на цеолите в статических условиях из растворов в дистиллированной (1–3) и водопроводной (4) воде при исходных концентрациях [NH₄⁺], мг/дм³: 1 – 5; 2, 4 – 10; 3 – 20 (V_p = 0,2 дм³, m_ц = 1000 мг).

В работах [10–13] изучалась эффективность удаления ионов аммония с помощью природного цеолита с милли- и нанометровыми размерами частиц. Установлено, что цеолит имеет производительность до 97 % по удалению аммония в зависимости от времени контакта, нагрузки цеолита, начальной концентрации аммония и pH. Начальные концентрации NH₄⁺ и Na⁺ оказали значительное влияние на количество поглощенного аммония. При уменьшении концентрации натрия в растворе растет количество поглощенного аммония, что приводит к большей эффективности его удаления. Модифицированный цеолит обладает высокой селективностью к NH₄⁺ и имеет максимальную эффективность удаления, достигающую 99 % [14].

В работах [15, 16] исследовалось удаление аммиака из водных растворов с использованием цеолита NaY, полученного из местных сельскохозяйственных отходов. Для сравнения использовали цеолит морденит в порошкообразных и гранулированных формах. Была найдена адсорбционная емкость монослоя для цеолита Г (42,37 мг/г), что выше, чем у порошкообразного (15,13 мг/г) и гранулированного (14,56 мг/г) морденита.

На рис.4 показаны результаты по кинетике сорбции аммония на цеолите (m_ц = 1 г) в статических условиях из растворов в дистиллированной и водопроводной воде при исходных концентрациях [NH₄⁺], равных 5, 10 и 20 мг/дм³. Из него видно, что сорбция из водопроводной воды проходит так же, как и из модельных растворов. Отмечено снижение концентрации аммония в растворе и увеличение адсорбции со временем контакта с сорбентом. При исходной концентрации 5 мг/дм³ за 120 ч происходит снижение концентрации до 0,23 мг/дм³, при 10 мг/дм³ — до 1,25 мг/дм³, при 20 мг/дм³ — до 4,8 мг/дм³.

Сорбцию в статическом режиме проводили в течение длительного времени, поэтому необходимо было выяснить кинетику сорбции ионов аммония в растворах хлорида аммония и аммиака. Для этого использовали водные растворы хлорида аммония и аммиака при концентрациях от 3 до 100 мг/дм³.

Из рис.5 видно, что в растворах NH₄Cl концентрация аммония существенно не меняется в течение 7 сут, а в водных растворах аммиака с высокими концентрациями содержание аммония снижается, что можно объяснить постепенным выветриванием аммиака. Поэтому в дальнейших опытах для получения более показательных результатов использовали растворы хлорида аммония.

При сорбции ионов аммония на цеолите (m_ц = 1 г) из растворов с концентрациями ам-

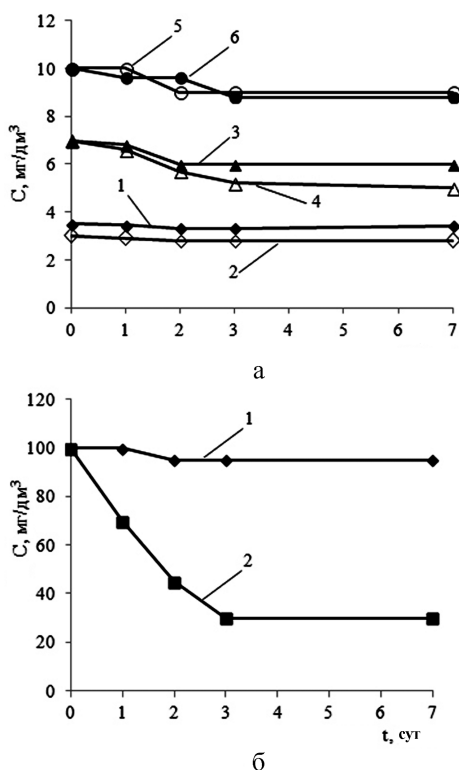


Рис.5. Изменение концентрации ионов аммония в растворах NH_4Cl (1; 3; 5) и NH_4OH (2; 4; 6) от времени хранения в дистиллированной воде при начальных концентрациях $[\text{NH}_4^+]$, мг/дм³: а — 3 (кр. 2); 3,5 (1); 7 (3, 4); 10 (5, 6); б — 100 (1, 2) ($V_p = 0,1 \text{ дм}^3$).

мония до 1500 мг/дм^3 отмечен рост величины адсорбции с повышением концентрации аммония в растворах. Изотермы адсорбции ионов аммония на цеолите ($m_{\text{ц}} = 1 \text{ г}$) представлены на рис.6. Время контакта раствора с сорбентом увеличивалось от 4 до 120 ч при исходных концентрациях от 5 до 1500 мг/дм^3 . Из него видно, что с увеличением концентрации аммония в растворе степень адсорбции возрастает и достигает предельного значения примерно в 40 мг/г .

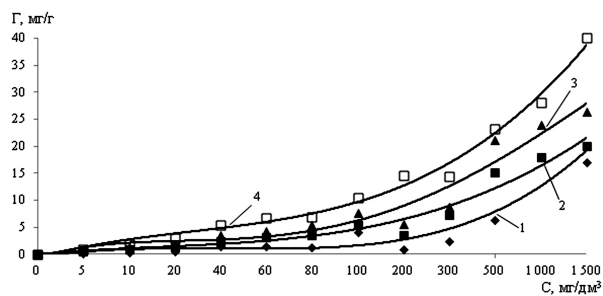


Рис.6. Изотермы адсорбции ионов аммония на цеолите через 4 (1), 24 (2), 48 (3), 120 (4) ч контакта раствора с сорбентом при исходных концентрациях $[\text{NH}_4^+]$ от 5 до 1500 мг/дм^3 ($V_p = 0,2 \text{ дм}^3$, $m_{\text{ц}} = 1000 \text{ мг}$).

Регенерацию цеолита проводили 9 %-м раствором NaCl . Данные исследования позволили установить, что степень десорбции аммония на цеолитах достаточно высока при использовании растворов NaCl и достигает 100 %.

Выводы

Установлено, что селективность катионита КУ-2-8 по ионам аммония зависит от формы, в которой находится ионит. Показано, что катионит в Na^+ -форме имеет меньшую селективность по ионам аммония, чем в H^+ -форме. Использование сильнокислотного катионита КУ-2-8 и слабокислотного катионита Dowex Мас-3 нецелесообразно для удаления аммония в присутствии ионов кальция. Это свидетельствует о необходимости предварительного умягчения воды перед ионообменной очисткой от аммония.

Изучены процессы регенерации анионита КУ-2-8 растворами хлорида натрия и соляной кислоты. Установлено, что регенерация катионита КУ-2-8 эффективна при использовании растворов соляной кислоты.

Исследована сорбция ионов аммония на цеолите марки ЦПС. Установлено, что сорбция из модельных растворов на дистиллированной воде проходит так же, как и из растворов на водопроводной воде. Установлена предельная емкость цеолита по ионам аммония — 40 мг/г .

Установлено, что в растворе NaCl степень регенерации при емкости цеолита 40 мг/г достигала 100 %.

Список литературы

1. ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання. — Введ. 01.01.2012.
2. Лобанов С.А. Технология выделения и утилизации аммонийного азота из сточных вод химических предприятий : Автореф. ... дис. канд. техн. наук. — Пермь. 2007. — 19 с.
3. Вишневський В.І. Річки і водойми України. Стан і використання. — Київ : Віпол, 2000. — 376 с.
4. Козловська С.Б., Сорокіна К.Б. Конспект лекцій з дисципліни «Спецкурс з очистки стічних вод». — Харків : Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва, 2008.
5. Гомеля М.Д., Трус І.М., Петриченко А.І., Шаблій Т.О. Іонообмінне вилучення з води нітратів // Вісн. Одес. держ. акад. будівництва та архітектури. — 2015. — № 59. — С. 19–24.
6. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М. : АКВАРОС, 2003. — 512 с.
7. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. — М. : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2004. — 702 с.

8. Гомеля М.Д., Голтвяницька О.В., Шаблій Т.О. Оцінка ефективності аніонітів в маловідходних процесах очищення води від нітратів // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». — 2012. — № 1. — С. 84–90.
9. Мартемьянов Д.В., Галанов А.И., Юрмазова Т.А. Определение сорбционных характеристик различных минералов при извлечении ионов As^{5+} , Cr^{6+} , Ni^{2+} из водных сред // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 8, ч. 3. — С. 666–670.
10. Widiastuti Nurul, Removal of ammonium from greywater using natural zeolite // Desalination. — 2011. — Vol. 277, № 1. — P. 15–23.
11. Malekian R., Abedi-Koupai J., Eslamian S.S., et al. Ion-exchange process for ammonium removal and release using natural Iranian zeolite // Applied Clay Science. — 2011. — Vol. 51, № 3. — P. 323–329.
12. Cyrus Johnsely S., Reddy G.B. Sorption and desorption of ammonium by zeolite : Batch and column studies // Journal of Environmental Science and Health. Part A. — 2011. — Vol. 46, № 4. — P. 408–414.
13. Khosravi Amir, Esmhosseini Majid, Jalili Jalal, Khezri Somayeh. Optimization of ammonium removal from waste water by natural zeolite using central composite design approach // Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry. — 2012. — Vol. 74, № 1–4. — P. 383–390.
14. Alshameri A., Ibrahim A., Assabri A.M., et al. The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite: Modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics // Powder Technology. — 2014. — Vol. 258. — P. 20–31.
15. Yusof A.M., Keat L.K., Ibrahim Z., et al. 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. — Vol. 174, № 1. — P. 380–385.
16. Liu Haiwei, Dong Screening of novel low-cost adsorbents from agricultural residues to remove ammonia nitrogen from aqueous solution // Journal of hazardous materials. — 2010. — Vol. 178, № 1. — P. 1132–1136.

Поступила в редакцію 03.07.17

**Макаренко І.М., канд. техн. наук, Трус І.М., канд. техн. наук,
Петриченко А. І., Кійченко О. Ю.**

**НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ
пр. Перемоги, 37, корп. 4, 03056 Київ, Україна, e-mail: petalig33@gmail.com**

Дослідження ефективності сорбційного очищення води від іонів амонію на природних та штучних сорбентах

Вивчено процеси іонообмінної очистки води від іонів амонію з модельних розчинів на катіонітах та на цеоліті. Встановлено залежності по сорбції амонію від форми іоніту, співвідношення амонію та кальцію у воді та рівня концентрацій іонів у розчині. Показано, що сильнокислотний катіоніт КУ-2-8 в Na^+ -формі має низьку селективність по іонах амонію у порівнянні з H^+ -формою. Встановлено, що у присутності іонів кальцію ефективність сорбції іонів амонію на катіонітах КУ-2-8 та Dowex Mac-3 знижується. Встановлено, що регенерація катіоніту КУ-2-8 більш ефективна при використанні розчинів соляної кислоти. Показано, що сорбція амонію на цеолітах з водопровідної води відбувається так само, як з модельних розчинів. Визначено, що гранична ємність цеоліту по іонах амонію становить 40 мг/г. Досліджено регенерацію цеоліту розчином хлориду натрію. Встановлено, що ступінь регенерації досягає 100 %. *Бібл. 16, рис. 6, табл. 1.*

Ключові слова: іонний обмін, сорбція, амоній, кальцій, регенерація, ємність сорбента, цеоліт.

Makarenko I.N., Candidate of Technical Sciences,
Trus I.N., Candidate of Technical Sciences, **Petrychenko A.I.**, **Kiichenko A.Yu.**
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»
 37, build. 4, Peremogy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: petaliq33@gmail.com

Study of the Efficiency of Sorption Treatment Water from Ammonium Ions on Natural and Artificial Sorbents

It was studied processes of ion-exchange water purification from ammonium ions from model solutions on cation exchangers and on zeolite. It was established dependencies ammonium sorption on the form of ion exchanger, the ratio of ammonium and calcium in water and the level of ion concentrations in solution. It was shown that the strongly acid cation exchanger KU-2-8 in Na⁺-form has a low selectivity for ammonium ions, in comparison with the H⁺-form. It was established that the sorption efficiency of ammonium ions on cation exchangers KU-2-8 and Dowex Mac-3 decreases in the presence of calcium ions. It was determined that regeneration of cation exchanger KU-2-8 was more effective when hydrochloric acid solutions were used. It was shown that ammonium sorption on zeolite from tap water goes in the same way as from model solutions. It was determined the boundary capacity of the zeolite for ammonium ions and it was amounted 40 mg/g. The regeneration of zeolite with a sodium chloride solution was investigated and it was established that the degree of regeneration reached 100 %. *Bibl. 16, Fig. 6, Tab. 1.*

Key words: ion exchange, sorption, ammonium, calcium, regeneration, sorbent capacity, zeolite.

References

1. DSTU 4808:2007. Dzherela centralizovanogo pytnogo vodopostachannja. Gigijenični ta ekologični vymogy shhodo jakosti vody i pravyla vybyrannja, 01.01.2012. (Ukr.)
2. Lobanov S.A. [Technology of separation and utilization of ammonium nitrogen from sewage of chemical enterprises] : Avtoref. Dys.... kand. tehn. nauk, Perm, 2007. — 19 p. (Rus.)
3. Vyshnevs'kyj V.I. [Rivers and reservoirs of Ukraine. Condition and use], Kiev : Vipol, 2000, 376 p. (Ukr.)
4. Ajrapetjan T.S. Summary of lectures on discipline «Special course on sewage treatment», Kharkov : Khark. nac. universitet miskogo gospodarstva, 2014, 90 p. (Ukr.)
5. Gomelja M.D., Trus I.M., Petrychenko A.I., Shabl'ij T.O. [Ion Exchange nitrate removal from water], *Visnyk Odes'koi derzhavnoi akademii' budivnytstva ta arhitektury*, 2015, (59), pp. 19–24. (Ukr.)
6. Zhmur N.S. [Technological and biochemical processes on waste water treatment in structures with aerotanks], Moscow : AKVAROS, 2003, 512 p. (Rus.)
7. Jakovlev S.V., Voronov Ju.V. [Wastewater and sewage treatment], Moscow : Izdatelstvo Asociacii stroitel'nyh vuzov, 2004, 702 p. (Rus.)
8. Gomelja M.D., Goltvjanyč'ka O.V., Shabl'ij T.O. [Estimation of efficiency of anionites in low-waste processes of water purification from nitrates], *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «KhPI»*, 2012, (1), pp. 84–90. (Ukr.)
9. Martem'janov D.V., Galanov A.I., Jurmazova T.A. [Determination of the sorption characteristics of various minerals in the recovery of As⁵⁺, Cr⁶⁺, Ni²⁺ ions from aqueous media], *Fundamental'nye issledovanija*, 2013, (8), Pt. 3, pp. 666–670. (Rus.)
10. Widiastuti Nurul. Removal of ammonium from greywater using natural zeolite, *Desalination*, 2011, 277 (1), pp. 15–23. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411002487>
11. Malekian R., Abedi-Koupai J., Eslamian S.S., Mousavi S.F., Abbaspour K.C., Afyuni M., Ion-exchange process for ammonium removal and release using natural Iranian zeolite, *Applied Clay Science*, 2011, 51 (3), pp. 323–329.
12. Cyrus Johnsely S., Reddy G.B. Sorption and desorption of ammonium by zeolite: Batch and column studies, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2011, 46 (4), pp. 408–414.
13. Khosravi Amir, Esmhosseini Majid, Jalili Jalal, Khezri Somayeh. Optimization of ammonium removal from waste water by natural zeolite using central composite design approach, *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 2012, 74 (1–4), pp. 383–390.
14. Alshameri A., Ibrahim A., Assabri A.M., Lei X., Wang H., Yan C., The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite : Modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics, *Powder Technology*, 2014, 258, pp. 20–31.
15. 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, 174 (1), pp. 380–385. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409015246>
16. Liu Haiwei, Dong, Liu Wang. Screening of novel low-cost adsorbents from agricultural residues to remove ammonia nitrogen from aqueous solution, *Journal of hazardous materials*, 2010, 178 (1), pp. 1132–1136. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410001536>

Received July 3, 2017