

- Пилатов, А. Ю. Теоретическое обоснование озонирования свежего заряда дизельного двигателя [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / А. Ю. Пилатов. — Минск, 2011. — 22 с.
- Ноженко, Е. С. Определение допустимых границ озонирования дизельного топлива [Текст] / Е. С. Ноженко, В. И. Могилы, О. Л. Игнатъев, Е. Л. Барышева // СНУ ім. Даля. — Луганск, 2011. — № 4(158), Ч. 1. — С. 156–160.
- Rotzoll, G. Mass spectrometric investigation and computer modeling of the methane-oxygen-ozone reaction from 480 to 830 K [Text] / G. Rotzoll // The Journal of Physical Chemistry. — 1986. — Vol. 90, № 4. — P. 677–683. doi:10.1021/j100276a039
- Nasser, S. H. A Novel Fuel Efficient and Emission Abatement Technique for Internal Combustion engines [Text] / S. H. Nasser, S. Morris, S. James. — 1998. — SAE Paper 982561. — Available at: \www/URL: http://dx.doi.org/10.4271/982561
- Звонов, В. А. Экология: альтернативные топлива с учетом их полного жизненного цикла [Текст] / В. А. Звонов, А. В. Козлов, А. С. Теренченко // Автомобильная промышленность. — 2001. — № 4. — С. 10–12.
- Звонов, В. А. Оценка ущерба от вредных выбросов в атмосферу двигателями внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Звонов, Л. С. Заиграев // Экологии и ресурсосбережение. — 1994. — № 2. — С. 9–18.
- Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Звонов. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1981. — 160 с.
- Кокурин, А. Д. Химические процессы в углеводородных пламенах [Текст] / А. Д. Кокурин // Процессы горения в химической технологии и металлургии. — Черноголовка, 1975. — С. 217–226.
- Кущевалов, В. А. Упрощенная математическая модель выгорания топлива в цилиндре дизеля [Текст] / В. А. Кущевалов и др. // Двигателестроение. — 1988. — № 8. — С. 6–8.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОЗОНИРОВАНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ САЖИ В ОТРАБОТАННЫХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ

В данной статье рассмотрено влияние озонирования топлива на процесс сгорания нефтяного дизельного топлива и дизельного топлива биологического происхождения. Проведено теоретическое исследование озонирования дизельного топлива. Приведена методика и результаты расчета температуры, содержания сажи и скорости ее образования в камере сгорания и в отработанных газах дизеля.

Ключевые слова: дизельное топливо, биодизель, МЭРО, сажа, сажевыделение.

Пилипенко Олександр Михайлович, доктор технічних наук, професор, кафедра автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Україна, e-mail: aleksandrpylypenko@ukr.net.

Рубан Дмитро Петрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Україна, e-mail: ruban_dimon@mail.ru.

Вір'ювка Дмитро Іванович, аспірант, кафедра автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Україна, e-mail: dmitriy_1989@ukr.net.

Голубов Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біохімії та екологічного контролю, Національний університет харчових технологій, Київ, Україна, e-mail: golas_as@ukr.net.

Пилипенко Олександр Михайлович, доктор технічних наук, професор, кафедра автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Україна.

Рубан Дмитро Петрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Україна.

Вір'ювка Дмитро Іванович, аспірант, кафедра автомобілів та технологій їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Україна.

Голубов Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біохімії та екологічного контролю, Національний університет харчових технологій, Київ, Україна.

Pylypenko Alexander, Cherkaskyy State Technological University, Ukraine, e-mail: aleksandrpylypenko@ukr.net.

Ruban Dmitriy, Cherkaskyy State Technological University, Ukraine, e-mail: ruban_dimon@mail.ru.

Vir'ovka Dmitriy, Cherkaskyy State Technological University, Ukraine, e-mail: dmitriy_1989@ukr.net.

Golubov Alexander, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: golas_as@ukr.net.

УДК 544.726

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.40640

**Афонин Г. Г.,
Безносик Ю. А.,
Дзязько Ю. С.,
Пономарева Л. Н.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕНА Ni^{2+} НА СИЛЬНОКИСЛОТНОЙ ИОНООБМЕННОЙ СМОЛЕ И ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКОМ ИОНИТЕ

В динамических условиях исследовано извлечение ионов Ni^{2+} из комбинированного раствора с использованием сильнокислотной гелевой катионообменной смолы и композиционного ионита на ее основе, содержащего агрегаты наночастиц гидрофосфата циркония. Предложена модель, позволяющая определить время, за которое достигается емкость до проскока по ионам Ni^{2+} . Модель предполагает использование только эмпирических параметров, отражающих концентрирование ионов в твердой фазе.

Ключевые слова: ионообмен, очистка воды, ионы никеля, кальция, магния, модель динамическая.

1. Введение

Наряду с обратным осмосом, ионный обмен традиционно используется при решении широкого спектра

практических задач, таких, например, как обессоливание воды [1], в частности, морской [1, 2], извлечение из сточных вод ценных и токсичных ионных компонентов [3, 4], очистка жидких пищевых продуктов [5],

концентрирование ионов для последующего аналитического определения [6] и многих других. Для расчетов процессов в ионообменных колонках обычно используют громоздкие модели, предполагающие использование таких параметров как коэффициенты диффузии ионов в растворе и ионите, обменная емкость последнего, коэффициенты селективности, размер частиц ионита и высота слоя, скорость раствора [7–9]. Наибольшее затруднение вызывает определение коэффициента диффузии обменивающихся ионов в ионите, поскольку этот параметр изменяется с увеличением степени замещения ионита и очень зависит от присутствующих в растворе других ионов, которые поглощаются ионитом как по обменному, так и по необменному механизму [7, 10]. При определении коэффициента селективности также возникают затруднения, если в растворе присутствуют несколько видов ионов одного знака заряда, а также при неполной диссоциации функциональных групп. В связи с этим актуальной является задача создания формализованной модели процесса в динамическом режиме, которая позволяет минимизировать количество параметров, исключив коэффициенты диффузии и селективности.

2. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — процесс ионного обмена в динамических условиях.

Цель исследования — создание формализованной модели обмена ионов, учитывающей только эмпирические параметры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Исследовать ионообменное извлечение ионов Ni^{2+} из раствора, содержащего также ионы жесткости, с использованием ионообменной смолы и органо-неорганического ионита.
2. Установить корреляцию между концентрацией ионов Ni^{2+} в растворе и обменной емкостью ионитов проскока.
3. Определить эмпирические параметры модели для различных ионитов.

3. Методика эксперимента

Исследовали сильнокислотный гелевый ионит *Dowex HCR-S (Dow Chemical)* с такими характеристиками: обменная емкость (Na^+) — 2,4 ммоль·см⁻³, содержание воды — 60 %, уменьшение объема при переводе из H- в Na-замещенную форму — 8 %. Ионит модифицировали агрегатами наночастиц гидрофосфата циркония, модифицирование заключалось в импрегнировании ионита золей нерастворимых гидроксокомплексов циркония и последующем осаждении в полимерной матрице гидрофосфата циркония (ГФЦ) раствором H_3PO_4 аналогично [11, 12]. Как было установлено с использованием сканирующей и трансмиссионной микроскопии, размер преобладающих агрегатов составлял несколько микрон (рис. 1), агрегаты состояли из наночастиц (≈10–15 нм). Содержание модификатора в композиционном ионите составляло 22 масс. %, водосодержание — 58 %, при переводе в Na^+ -замещенную форму объем ионита уменьшается в 1,5 раз.

В динамическом режиме осуществляли деионизацию комбинированного раствора, приготовленного на водопроводной воде, которых содержал (ммоль·дм⁻³):

Ca^{2+} (1,4), Mg^{2+} (0,5), а также Ni^{2+} (0,05–2). Выбор соли указанного *d*-металла в качестве модельного объекта обусловлен токсичностью соединений Ni, вследствие чего их содержание в воде жестко регламентировано. Раствор пропускали через колонку диаметром 0,8 см с постоянной скоростью (0,15 см³·с⁻¹) [11, 12]. Содержание ионов на выходе из колонки определяли атомно-абсорбционным методом при помощи прибора S9 Pyc Unicam (Philips).

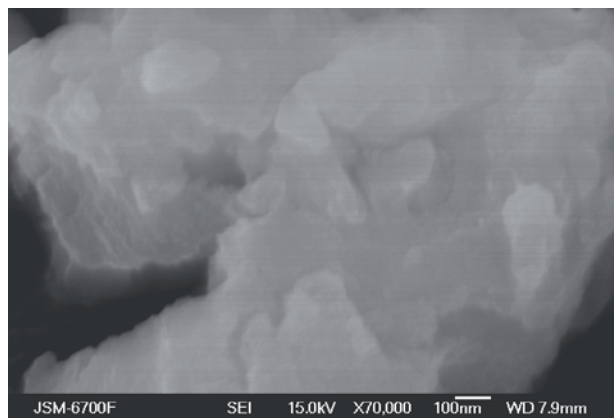


Рис. 1. ТЭМ-изображение агрегатов ГФЦ, инкорпорированных в ионообменную смолу

4. Результаты исследования ионного обмена $Ni^{2+} \rightarrow H^+$ на полимерном и органо-неорганическом ионите

Рис.2 иллюстрирует типичные выходные кривые ионов Ni^{2+} , полученные для полимерного и органо-неорганического ионита — зависимости концентрации ионов на выходе из колонки от объема пропущенного раствора. Кривые демонстрируют широкое плато и подъем, отвечающий емкости до проскока ионита (A , ммоль·см⁻³) — эта величина, зависящая от условий процесса (состава раствора и его скорости, геометрических параметров на сыпного слоя), отвечает некоторой степени замещения ионита, при которой максимальная степень извлечения тех или иных ионов из раствора уже не реализуется.

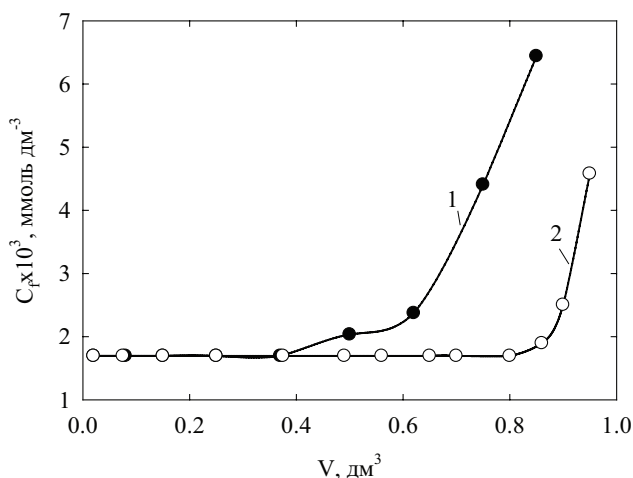


Рис. 2. Концентрация ионов Ni^{2+} в растворе на входе и на выходе из колонки/Ионит-немодифицированный полимер (1), органо-неорганический (2)

Емкость до проскока рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(C - C_f)V}{v}, \quad (1)$$

где C и C_f — концентрация ионов в растворе на входе и на выходе из колонки ($\text{ммоль} \cdot \text{см}^{-3}$), V — объем раствора (см^3), v — объем ионита (см^3).

Зависимости величин A от исходной концентрации Ni^{2+} , представленная на рис. 3, описываются линейными полиномами:

$$A = a_1 C + a_0, \quad (2)$$

где a — эмпирические коэффициенты, здесь a_0 — обменная емкость ионита, достигаемая при бесконечно малом содержании ионов в растворе ($\text{моль} \cdot \text{см}^{-3}$), a_1 — коэффициент, отражающий концентрирование Ni^{2+} в твердой фазе (безразмерный). Величину a_1 можно рассматривать как аналог коэффициента распределения, который определяют в статических условиях [7]. Коэффициенты a_0 , полученные для немодифицированного и органо-неорганического ионитов, весьма близки (0,018 и 0,012 $\text{ммоль} \cdot \text{см}^{-3}$ соответственно), а значения a_1 составляют 40 и 77 соответственно.

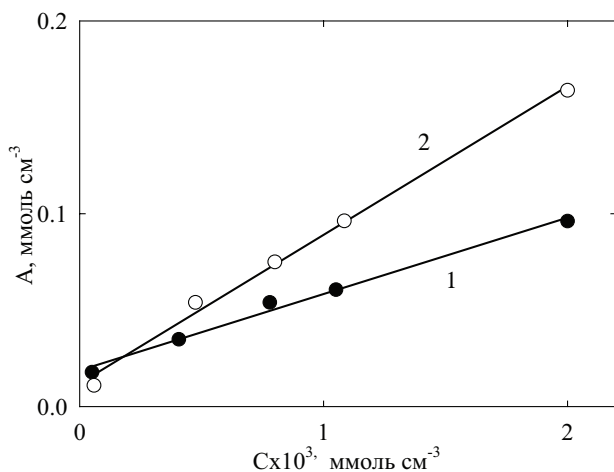


Рис. 3. Обменная емкость до проскока по катионам Ni^{2+} катионообменной смолы (1) и органо-неорганического ионита (2) как функция начального содержания этих ионов в растворе

Иными словами, введение неорганического модификатора ГФЦ в сильноокислотную смолу усиливает способность ионита концентрировать ионы Ni^{2+} в присутствии ионов жесткости. Поскольку для ионитов, модифицированных агрегатами наночастиц ГФЦ, характерны более низкая подвижность сорбированных ионов и обменная емкость [11, 12], улучшение сорбционной способности композитов, очевидно, связано с особенностями ионного обмена на ГФЦ. Ранее было установлено, что обмен $\text{Ni}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ на ГФЦ сопровождается частичным гидролизом $\text{Ni}^{2+} \rightarrow \text{NiOH}^+$ сорбированных ионов непосредственно в фазе ионита [13] (в нейтральном растворе содержание форм NiOH^+ весьма незначительно [14]). Ионы Ni^{2+} и NiOH^+ образуют комплексы с фосфорнокислыми функциональными группами [13]. Вероятно,

комплексы с указанными катионами более устойчивы, чем с ионами жесткости, что и обуславливает преимущественное поглощение токсичных ионов композитом.

Для немодифицированной катионообменной смолы зависимость $A - V/v$ представляет собой инверсионный полином первого порядка (рис. 4):

$$A = \frac{b_1 v}{V} + b_0, \quad (3)$$

где b_0 — емкость до проскока при $V \rightarrow \infty$, $\text{ммоль} \cdot \text{см}^{-3}$. В случае органо-неорганического ионита справедливо:

$$A = \frac{b_2 v^2}{V^2} + \frac{b_1 v}{V} + b_0. \quad (4)$$

Поскольку $V = \omega \tau$, где τ — время, за которое достигается емкость до проскока, мин, ω — объемная скорость раствора ($\text{см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$), вид полиномов свидетельствует о большей емкости, которая достигается для органо-неорганического ионита при низкой скорости потока раствора, чем для исходной смолы. Коэффициент b_0 отражает способность ионита сорбировать те или иные ионы при высокой скорости раствора. Отрицательное значение b_0 в случае полимерного ионита ($-0,01 \text{ ммоль} \cdot \text{см}^{-3}$), достигается, очевидно, за счет $\tau \rightarrow 0$ при $\omega \rightarrow \infty$. В то же время, для модифицированного ионита указанный коэффициент составляет положительное значение ($0,1 \text{ ммоль} \cdot \text{см}^{-3}$), таким образом, и при высокой скорости потока раствора ионит будет демонстрировать большую емкость до проскока по сравнению с немодифицированным.

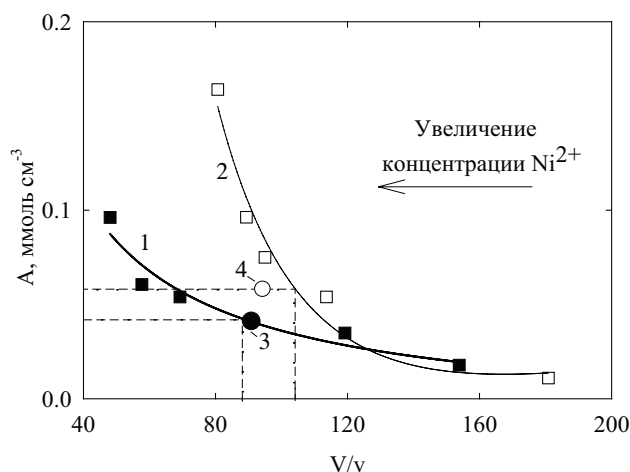


Рис. 4. Обменная емкость до проскока по катионам Ni^{2+} катионообменной смолы (1) и органо-неорганического ионита (2) как функция соотношения объемов пропущенного раствора и ионита. (3) и (4) — теоретически рассчитанные значения для исходного и модифицированного ионитов

Приравняв выражения (2) и (3), получаем соотношение V/v , при котором будет достигаться емкость до проскока для немодифицированного ионита:

$$\frac{V}{v} = \frac{b_1}{a_1 C + a_0 - b_0}. \quad (5)$$

Например, при исходной концентрации Ni^{2+} 6×10^{-4} ммоль \cdot см $^{-3}$ получаем $V/v = 91$, учитывая, что $b_1 = 4,75$ ммоль \cdot см $^{-3}$, а емкость до проскока, рассчитанная по уравнению (2), составляет 0,042 ммоль \cdot см $^{-3}$. Величина V/v соответствует функции (3).

Для органо-неорганического ионита приравнивание выражений (2) и (4) дает:

$$\frac{b_2 v^2}{V^2} + \frac{b_1 v}{V} + b_0 = a_1 C + a_0. \quad (6)$$

Решив уравнение относительно V/v , получаем:

$$\frac{V}{v} = \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - a_1 C - a_0)}}{2(b_0 - a_1 C - a_0)}. \quad (7)$$

С учетом того, что $b_1 = -32$, а $b_2 = 2937$ ммоль \cdot см $^{-3}$, $V/v = 91$ или 688 при указанной выше концентрации Ni^{2+} , при этом достигается емкость до проскока 0,058 ммоль \cdot см $^{-3}$. Согласно данным рис. 4, истинным является значение $V/v = 91$, таким образом,

$$\frac{V}{v} = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - a_1 C - a_0)}}{2(b_0 - a_1 C - a_0)}.$$

Помимо этого, соотношение V/v можно записать

как $\frac{hS}{\omega t}$, где h — высота слоя, а S — поперечное

сечение колонки. Указанное выражение позволяет рассчитать время, необходимое для достижения емкости до проскока при заданной скорости потока раствора и геометрических параметрах слоя.

5. Обсуждение результатов исследований ионного обмена $\text{Ni}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ на полимерном и органо-неорганическом ионите

Исследования являются продолжением проводимых авторами статьи работ, посвященных получению органо-неорганических ионообменных материалов и изучению их функциональных свойств [10–12]. В данной работе сопоставлены катионообменная смола и органо-неорганический ионит на основе этой смолы, модифицированный гидрофосфатом циркония. При изучении ионообменного извлечения Ni^{2+} из комбинированных растворов, содержащих ионы жесткости, получена математическая модель, варьируемыми параметрами которой являются концентрация извлекаемых ионов, а также соотношение максимального объема раствора, при котором достигается емкость до проскока, и ионита. Получены корреляционные уравнения, позволяющие определять емкость ионитов до проскока без предварительного определения коэффициентов селективности и диффузии сорбированных ионов, а также режима обмена (внешне-, внутридиффузионного либо смешанного). Это является преимуществом модели, поскольку для определения режима процесса, а также указанных характеристик ионитов, необходим большой массив эксперименталь-

ных данных, которые не всегда могут быть адекватно интерпретированы, особенно при извлечении ионов из многокомпонентного раствора.

Коэффициенты корреляционных уравнений позволяют сравнивать различные иониты. Так, например, для ионита, модифицированного ГФЦ, коэффициент, отражающий концентрирование ионов Ni^{2+} при извлечении из комбинированного раствора, выше в 2 раза, чем для немодифицированного. Модель предполагает также варьирование геометрических параметров слоя ионита и скорости раствора, верификация этого предположения составляет предмет дальнейших исследований. Предметом дальнейших исследований является также создание модели, учитывающей извлечение ионитами также и ионов жесткости и позволяющей прогнозировать условия, при которых достигается максимальное разделение ионов. Открытым остается также вопрос о применении установленных корреляционных уравнений к другим ионитам. Тем не менее, подход, основанный на аппроксимации зависимостей обменной емкости от концентрации раствора и его объема, несомненно, может быть применим и для других сорбционных материалов.

Полученная модель после верификации и указанных дополнений в перспективе может быть использована для расчета ионообменных и сорбционных процессов, направленных на извлечение из комбинированного раствора того или иного компонента.

6. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Путем исследования ионообменного извлечения Ni^{2+} из комбинированных растворов, содержащих также ионы жесткости, решена задача создания формализованной модели ионного обмена с использованием минимального количества варьируемых параметров. Обмен изучали на примере ионообменная смола и органо-неорганический ионит на ее основе.
2. Установлены зависимости емкости до проскока: линейная — от начальной концентрации Ni^{2+} и обратно-пропорциональная — от соотношения объемов раствора и ионита.
3. Данная модель предполагает использование только эмпирических параметров, полученных при исследовании ионного обмена в динамическом режиме и не требует предварительного определения коэффициентов селективности и диффузии сорбированных ионов, а также режима обмена (внешне-, внутридиффузионного либо смешанного).
4. По коэффициентам эмпирических уравнений можно судить о сорбционном сродстве ионита к тем или иным ионам, извлекаемым из комбинированного раствора, а также сравнивать различные иониты.

Литература

1. Spellman, F. R. Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations [Text] / F. R. Spellman. — CRC Press, 2003. — 521 p. doi:10.1201/9780203489833
2. Dreizin, Y. Integrating large scale seawater desalination plants within Israel's water supply system [Text] / Y. Dreizin, A. Tenne, D. Hoffman // Desalination. — 2008. — Vol. 220, № 1–3. — P. 132–149. doi:10.1016/j.desal.2007.01.028

3. Al-Enezi, G. Ion Exchange Extraction of Heavy Metals from Wastewater Sludges [Text] / G. Al-Enezi, M. F. Hamoda, N. Fawzi // Journal of Environmental Science and Health, Part A. — 2004. — Vol. 39, № 2. — P. 455–464. doi:10.1081/ese-120027536
4. Hubicki, Z. Application of Ion Exchange Methods in Recovery of Pd(II) Ions [Text] / Z. Hubicki, M. Wawrzkiwicz, A. Wozniak // Chem. Anal. (Warsaw). — 2008. — Vol. 53. — 759 p.
5. Kammerer, J. Adsorption and Ion Exchange: Basic Principles and Their Application in Food Processing [Text] / J. Kammerer, R. Carle, D. R. Kammerer // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2011. — Vol. 59, № 1. — P. 22–42. doi:10.1021/jf1032203
6. Korkisch, J. Handbook of Ion Exchange Resins [Text] / J. Korkisch. — CRC Press, 1998. — Vol. 6. — 352 p.
7. Helfferich, F. Ion Exchange [Text] / F. Helfferich. — New York, USA: Dover, 1995. — P. 250–420.
8. Lin, S. H. Chromic acid recovery from waste acid solution by an ion exchange process: equilibrium and column ion exchange modeling [Text] / S. H. Lin, C. D. Kiang // Chemical Engineering Journal. — 2003. — Vol. 92, № 1–3. — P. 193–199. doi:10.1016/s1385-8947(02)00140-7
9. Ben-Shebil, S. Fixed-bed ion exchange columns operating under non-equilibrium conditions: Estimation of mass transfer properties via non-equilibrium modeling [Text] / S. Ben-Shebil, A. Alkan-Sungur, A. R. Özdural // Reactive and Functional Polymers. — 2007. — Vol. 67, № 12. — P. 1540–1547. doi:10.1016/j.reactfunctpolym.2007.07.040
10. Дзязько, Ю. С. Кинетика обмена Ni^{2+} на гибридных органо-неорганических ионитах: влияние пористой структуры полимера [Текст] / Ю. С. Дзязько, Л. Н. Пономарева, Ю. М. Вольфович, В. Е. Сосенкин // Журнал физической химии. — 2012. — Т. 86, № 6. — С. 1019–1025.
11. Dzyazko, Y. S. Ion-exchange resin modified with aggregated nanoparticles of zirconium hydrophosphate. Morphology and functional properties [Text] / Y. S. Dzyazko, L. N. Ponomaryova, Y. M. Volfovich, V. V. Trachevskii, A. V. Palchik // Microporous and Mesoporous Materials. — 2014. — Vol. 198. — P. 55–62. doi:10.1016/j.micromeso.2014.07.010
12. Дзязько, Ю. С. Органо-неорганические иониты для извлечения токсичных примесей из водных растворов [Текст] / Ю. С. Дзязько, Л. Н. Пономарева, В. Н. Беляков, Ю. М. Вольфович, В. Е. Сосенкин // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2012. — Т. 12, № 4. — С. 554–562.
13. Дзязько, Ю. С. Взаимодействие сорбированных ионов $Ni(II)$ с аморфным гидрофосфатом циркония [Текст] / Ю. С. Дзязько, В. В. Трачевский, Л. М. Рождественская, С. Л. Василюк, В. Н. Беляков // Журнал физической химии. — 2013. — Т. 87, № 5. — С. 857–862. doi:10.7868/s0044453713050063
14. Srivastava, V. C. Competitive adsorption of cadmium(II) and nickel(II) metal ions from aqueous solution onto rice husk ash [Text] / V. C. Srivastava, I. D. Mall, I. M. Mishra // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. — 2009. — Vol. 48, № 1. — P. 370–379. doi:10.1016/j.ccep.2008.05.001

МОДЕЛЮВАННЯ ОБМІНУ Ni^{2+} НА СИЛЬНОКИСЛОТНІЙ ІОНООБМІННІЙ СМОЛІ І ОРГАНО-НЕОРГАНІЧНОМУ ІОНІТІ

В динамічних умовах досліджено вилучення іонів Ni^{2+} з комбінованого розчину з використанням сильнокислотної гелевої катіонообмінної смоли та композиційного іоніту на її основі, що містить агрегати наночасток гідрофосфату цирконію. Запропоновано модель, що дозволяє визначити час, за який досягається ємність до проскоку по іонітах Ni^{2+} . Модель ґрунтується на застосуванні лише емпіричних параметрів, що відображають концентрування іонів у твердій фазі.

Ключові слова: іонообмін, очистка води, іони нікелю, кальцію, магнію, модель динамічна.

Афонін Геннадій Геннадієвич, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: kaareel@yahoo.com.

Безносик Юрій Александрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: yu_beznosyk@ukr.net.

Дзязько Юлія Сергіївна, доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, відділ сорбційних та мембранних матеріалів та процесів, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, Київ, Україна, e-mail: dzyazko@gmail.com.

Пономарева Людмила Николаєвна, кандидат хімічних наук, відділ сорбційних та мембранних матеріалів та процесів, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, Київ, Україна, e-mail: ponomarouva@gmail.com.

Афонін Геннадій Геннадійович, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Безносик Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Дзязько Юлія Сергіївна, доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, відділ сорбційних та мембранних матеріалів та процесів, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, Київ, Україна.

Пономарева Людмила Миколаївна, кандидат хімічних наук, відділ сорбційних та мембранних матеріалів та процесів, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, Київ, Україна.

Afonin Gennadiy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: kaareel@yahoo.com.

Beznosyk Yuriy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: yu_beznosyk@ukr.net.

Dzyazko Yuliyia, V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine, e-mail: dzyazko@gmail.com.

Ponomareva Ludmila, V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine, e-mail: ponomarouva@gmail.com