

утилізації відходів. Розроблено математичні моделі функціональних елементів енерготехнологічної установки поділу багатокомпонентних газових сумішей, отриманих при утилізації відходів. У дослідженні описано модель комплексу як єдиного цілого і як виконавчої частини системи управління екологічною безпекою процесу утилізації відходів.

Ключові слова: утилізація, відходи, екологічна безпека, математичне моделювання, багатокомпонентні газові суміші, низькотемпературний поділ.

Вамболь Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина.

Шахов Юрий Васильевич, старший научный сотрудник, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Вамболь Виола Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, экологии и экспертных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: violavambol@gmail.com.

Петухов Илья Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Вамболь Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина.

Шахов Юрий Васильевич, старший научный сотрудник, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Вамболь Виола Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, экологии и экспертных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Петухов Илья Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Vambol Sergij, National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

Shakhov Yuriy, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

Vambol Viola, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: violavambol@gmail.com.

Petukhov Ilya, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

УДК 544.726

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.58747

**Афонін Г. Г.,
Безносик Ю. О.,
Дзязько Ю. С.,
Складанний Д. М.,
Бондаренко О. С.**

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ НІКЕЛЮ ІЗ КОМБІНОВАНИХ РОЗЧИНІВ

Досліджено вилучення іонів Ni^{2+} з комбінованого розчину з використанням сильноокислотної гелевої катіонообмінної смоли та композиційного іоніту на її основі, що містить агрегати наночасток гідрофосфату цирконію. За допомогою планування експерименту отримано моделі процесу вилучення іонів Ni^{2+} з розчину за допомогою полімерного та орґано-неорґанічного іоніту.

Ключові слова: іонообмін, очистка води, іони нікелю, кальцію, магнію, математична модель, планування експерименту.

1. Вступ

Інтенсивне зростання промислового виробництва й енергетики, освоєння природних ресурсів і розвитку сільського господарства в районах з обмеженими джерелами прісної води, ріст народонаселення створюють в усьому світі дефіцит прісної води. Поряд з цим, розвиток деяких галузей промисловості, зокрема, таких як оптична, фармацевтична, хімічна обумовлює зростання необхідності у воді з високим ступенем очищення. У той же час збільшуються обсяги стічних вод, які, у свою чергу, впливають на навколишнє середовище і стан водних басейнів. Насичення природного середовища шкідливими речовинами зокрема токсичними важкими металами стає все більш усвідомлюваною небезпечкою для нормальної життєдіяльності і здоров'я людства.

В наш час глибоке очищення води здійснювалось, в основному, з використанням іонного обміну. Іонний

обмін успішно доповнює процеси коагуляції, баромембранної фільтрації, зокрема зворотного осмосу тощо. Іонний обмін використовується для вирішення багатьох наукових і практичних задач: для концентрування іонів з метою їх подальшого аналітичного визначення, вилучення токсичних та цінних компонентів із рідких промислових відходів, отримання пом'якшеної і питної води тощо. Застосування іонного обміну у промисловості потребує кількісної оцінки перебігу процесів.

Тому проблема розробки ефективних способів очищення води від небажаних домішок залишається вельми актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження процесів іонного обміну потребує значних затрат часу та матеріальних ресурсів. Для розрахунків

Таблиця 1

Фактори варіювання при іонному обміні

x_i	Фактор	Рівні фактора	
		-1	+1
x_1	Концентрація іонів Са, ммоль/л	0,5	2
x_2	Концентрація іонів Mg, ммоль/л	0,25	1
x_3	Концентрація іонів Ni, ммоль/л	0,1	2
x_4	Витрата розчину, v , мл/хв	5	30

процесу іонообміну зазвичай використовують громіздкі моделі, що припускають використання таких параметрів, як коефіцієнти дифузії іонів в розчині і іоніте, обмінна ємність останнього, коефіцієнти селективності, розмір часток іоніту, висота шару іоніту, швидкість розчину [1–3]. Найбільше утруднення викликає визначення коефіцієнта дифузії іонів, оскільки цей параметр змінюється зі збільшенням ступеня заміщення іоніту і дуже залежить від присутніх в розчині інших іонів, які поглинаються іонітом по різним механізмам [1, 4, 5]. При визначенні коефіцієнта селективності також виникають труднощі, якщо в розчині присутні кілька видів іонів одного знаку заряду, а також при неповній дисоціації функціональних груп. У зв'язку з цим актуальною є задача створення формалізованої моделі процесу в динамічному режимі, яка дозволяє мінімізувати кількість параметрів, виключивши коефіцієнти дифузії та селективності.

Ця робота присвячена задачі вибіркового вилучення іонів нікелю із розбавлених розчинів методом дослідження закономірностей іонного обміну в залежності від масообмінних, гідродинамічних і, особливо, концентраційних факторів [4–6]. Найбільш раціональним методом експериментального дослідження динамічних закономірностей є математичне планування експерименту [7, 8]. Перевага цього методу полягає в тому, що він не потребує інформації про механізм процесу і тому доступний навіть неспеціалістам в області іонного обміну.

3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — комп'ютерне моделювання процесу іонного обміну в динамічних умовах для полімерного та органо-неорганічного іоніту.

Метою дослідження є створення формалізованої моделі обміну іонів, що враховує тільки емпіричні параметри.

Методи дослідження — математичне та комп'ютерне моделювання, методи планування експерименту.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- виконати планування експерименту для дослідження процесу іонного обміну;
- дослідити іонообмінний витяг іонів Ni^{2+} з розчину, що містить також іони жорсткості, з використанням іонообмінної смоли і органо-неорганічного іоніту;
- обробка експериментальних даних та отримання математичної моделі процесу іонного обміну;
- за отриманою моделлю провести оптимізацію задля визначення параметрів, які дозволяють отримати максимальне значення ємності до проскакування.

4. Розрахунок іонного обміну

Побудуємо регресійне рівняння для достатньо точно розрахунку параметрів процесу іонного обміну, який досліджується, в прийнятих інтервалах зміни факторів. У якості змінних приймаємо об'єм розчину, що очищується одиницею маси іоніту, тривалість фільтроциклу та робочу об'ємну ємність іоніту. Факторами, що підлягають вивченню, приймаються — концентрація іона, що сорбується; концентрація інших іонів; рН розчину; питома навантаження. Фактори та інтервали їх варіювання зведемо у табл. 1.

Інші фактори, що впливають на іонний обмін, піддаються варіюванню в достатньо широких інтервалах і не входять в дане дослідження. У виборі факторів та інтервалів їх варіювання враховуємо можливі обмеження технологічного, екологічного та економічного характеру.

Автори публікацій [7, 8] пропонують обирати тип, марку та іонну форму іоніту, тип хімічної реакції та відповідний реагент, що зміщує рівновагу процесу у бажаному напрямку. Вибір проводиться шляхом вивчення і порівняння властивостей іонітів, зняття ізотерм сорбції у статичних умовах [8]. Крім того, розраховують оптимальну довжину іонного шару з використанням модифікованих рівнянь динаміки сорбції Шилова і постановкою 2...3 дослідів різної довжини шару в динамічних умовах при заданому питомому навантаженню. На цій стадії може виявитися корисним досвід використання іонітів у водопідготовці і гідрометалургії.

Поміж знаходження рівнянь для розрахунку і опису процесу методом планування експерименту можна оптимізувати процес, тобто знайти екстремальні значення шуканих функцій. Для цього зазвичай використовують метод крутого сходження і симплексний метод [9–11].

5. Планування експерименту

Практичний інтерес при розрахунку процесів іонного обміну представляє вивчення початку проскакування іонів Ni^{2+} (A , моль/см³), а також початок проскакування іонів жорсткості. Тобто завданням є отримання математичної моделі, яка показує залежність моменту проскакування від початкових концентрацій іонів металів на витрати розчину. Запишемо ці фактори, які впливають на процес, у вигляді табл. 1.

У ході розв'язання цієї задачі знайдено вид залежності для полімерного та органо-неорганічного іоніту. Оскільки ця залежність має бути нелінійною, модель шукаємо у вигляді поліному другого порядку [10, 11]:

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \\
 & + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + \\
 & + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + \\
 & + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2.
 \end{aligned} \quad (1)$$

Для постановки експерименту пропонується трирівневий план [12], який передбачає проведення 18-ти експериментів (без паралельних) (табл. 2).

Значення кожного фактору фіксується на трьох рівнях: від'ємний, нульовий та додатний.

Таблиця 2

Трирівневий план експерименту

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0	0	0	0
2	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	+1	+1
4	+1	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1
6	+1	+1	+1	-1
7	0	+1	-1	-1
8	0	-1	+1	-1
9	0	-1	-1	+1
10	+1	0	-1	-1
11	-1	0	+1	-1
12	-1	0	-1	+1
13	+1	-1	0	-1
14	-1	+1	0	-1
15	-1	-1	0	+1
16	+1	-1	-1	0
17	-1	+1	-1	0
18	-1	-1	+1	0

6. Пошук моделі для полімерного іоніту

У роботі досліджувався сильнокислотний гелевий іоніт *Dowex HCR-S (Dow Chemical)* з такими характеристиками: обмінна ємність (Na^+) – 2,4 ммоль/см³, вміст води – 60 %, зменшення об'єму при переході з Н- в Na-заміщену форму – 8 % [13]. Іоніт модифікували агрегатами наночастинок гідрофосфату цирконію, модифікування полягало в насиченні іоніту зорем нерозчинних гідроксокомплексів цирконію і наступному осадженні в полімерній матриці гідрофосфату цирконію розчином H_3PO_4 аналогічно [14, 15]. Як було встановлено з використанням скануючої і трансмісійної мікроскопії, розмір переважаючих агрегатів становив кілька мікрон, агрегати склалися з наночастинок ($\approx 10\text{--}15$ нм). Вміст модифікатора в композиційному іоніті становив 22 мас %, водовміст – 58 %, при переході в Na^+ -заміщену форму обсяг іоніту зменшується в 1,5 рази. У динамічному режимі здійснювали деіонізацію комбінованого розчину, приготованого на водопровідній воді, який містив (ммоль/дм³): Ca^{2+} (1,4), Mg^{2+} (0,5), а також Ni^{2+} (0,05...2). Вибір солі зазначеного *d*-металу як модельного об'єкта обумовлений токсичністю сполук Ni, внаслідок чого їх вміст у воді жорстко регламентовано. Розчин пропускали через колонку діаметром 0,8 см з постійною швидкістю [13–15]. Вміст іонів на виході з колонки визначали атомно-абсорбційним методом за допомогою приладу *S9 Pye Unicam (Philips)*.

Для одержання моделі було проведено ряд експериментів згідно плану (табл. 2) і отримано такі результати (табл. 3).

Таблиця 3

Результати експерименту для полімерного іоніту

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	220	240	190	170	250	650	756	780	500
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	450	700	240	300	400	240	560	630	250

Для зведення значень усіх факторів до однакової безрозмірної шкали виконано кодування факторів. Значення коефіцієнтів рівняння (1) знайдено за допомогою метода найменших квадратів у матричній формі [16]:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot (X^T Y), \quad (2)$$

де B – матриця-стовпець коефіцієнтів моделі; X – розширена матриця плану експерименту; Y – матриця-стовпець значень вихідної змінної.

Після виконання розрахунків із урахуванням (2) вектор-стовпець коефіцієнтів моделі матиме вигляд:

$$B \{220 \quad -22,2 \quad 12,5 \quad -27,7 \quad -167 \quad -71,7 \quad -40,9 \quad -44,9 \\ -28 \quad -84,5 \quad -115 \quad -127 \quad 95 \quad 231,7 \quad -1,67\}.$$

Отже, вигляд математичної моделі, що описує залежність зміни величини ємності до просакування від початкових концентрацій іонів металів та витрати потоку, для полімерного іоніту має вигляд:

$$y = 220 - 22,4x_1 + 12,5x_2 - 27,7x_3 - 167x_4 - \\ - 71,7x_1x_2 - 40,9x_1x_3 - 44,9x_1x_4 - \\ - 28x_2x_3 - 84,5x_2x_4 - 115x_3x_4 - 127x_1^2 + \\ + 95x_2^2 + 231,7x_3^2 - 1,67x_4^2. \quad (3)$$

Перевірку адекватності моделі виконано за допомогою порівняння дисперсії відтворюваності S_0^2 та дисперсії адекватності $S_{\text{адк}}^2$. Значення цих величин розраховані у програмі *Stat Sens* таким же чином, як за алгоритмом дисперсійного аналізу, у зв'язку з відсутністю паралельних дослідів [16].

За результатами розрахунків виявилось, що $S_0^2 = 31916 > S_{\text{адк}}^2 = 31740$. Так як дисперсія відтворюваності більша, ніж дисперсія адекватності, тому отримана модель (3) є адекватною [16].

7. Пошук моделі для орґано-неорґанічного іоніту

Для одержання моделі орґано-неорґанічного іоніту було проведено серію експериментів згідно плану (табл. 2) і отримано наступні результати (табл. 4). Необхідність повторення саме цієї серії експериментів полягає в необхідності порівняння двох отриманих моделей.

Таблиця 4

Результати експерименту для орґано-неорґанічного іоніту

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	420	660	470	400	460	640	975	1110	770
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	690	960	550	580	680	590	790	910	550

Для знаходження значень коефіцієнтів моделі необхідно повторити розрахунок за методом найменших квадратів у матричній формі. Нижче наведено кінцевий результат (вектор-стовпець коефіцієнтів моделі):

$B\{420 - 88,4 - 43,8 - 61,9 - 163 - 84,4 - 43,5 - 45,6 - 55,8 - 42,9 - 95,7 - 126 - 116,9 - 236,9 - 23,57\}$.

Отже, математичний вигляд моделі, що описує залежність зміни величини ємності до просакування від початкових концентрацій іонів металів та витрати потоку, для органо-неорганічного іоніту має вигляд:

$$y = 420 - 88,4x_1 - 43,8x_2 - 61,9x_3 - 163x_4 - 84,4x_1x_2 - 43,5x_1x_3 - 45,6x_1x_4 - 55,8x_2x_3 - 42,9x_2x_4 - 95,7x_3x_4 - 126x_1^2 + 116,9x_2^2 + 236,9x_3^2 + 23,57x_4^2. \quad (4)$$

Перевірку адекватності моделі виконано за допомогою порівняння дисперсії відтворюваності S_0^2 та дисперсії адекватності $S_{\text{адк}}^2$. Значення цих величин розраховані у програмі *Stat Sens*.

За результатами розрахунків виявилось, що $S_0^2 = 31916 > S_{\text{адк}}^2 = 31740$. Так як дисперсія відтворюваності більша, ніж дисперсія адекватності, тому отримана модель (2) є адекватною.

8. Оптимізація за отриманими моделями

Наступним завданням є пошук оптимальних параметрів, за яких об'єм пропущеного розчину крізь шар іоніту до моменту просакування буде максимальним. Тобто потрібно знайти, за яких умов можна очистити якнайбільшу кількість води від іонів Ni^{2+} та іонів жорсткості Ca^{2+} та Mg^{2+} . Цю задачу розв'язано методом спряжених градієнтів, який реалізовано у стандартному компоненті «Пошук рішення» пакету MS Excel.

Знайдемо за допомогою підпрограми «Пошук рішення» значення концентрацій іонів металів у розчині та витрати потоку, за яких буде спостерігатись максимальна ємність до просакування для полімерного іоніту (3). Оптимальне (максимальне) значення цільової функції дорівнює приблизно 885 за умови, що $x_1 = -0,3627$; $x_2 = 1$; $x_3 = 1$; $x_4 = -1$. Якщо кодовані значення факторів перевести у натуральний вигляд, то розв'язок задачі оптимізації запишеться таким чином: при значенні концентрації $[\text{Ca}^{2+}] = 1,1107$ ммоль/л; $[\text{Mg}^{2+}] = 1$ ммоль/л; $[\text{Ni}^{2+}] = 2$ ммоль/л; витраті $v = 30$ мл/хв можна ефективно очистити 885 мл розчину від іонів Ni^{2+} та іонів жорсткості до настання просакування. Після очищення даного об'єму розчину процес іонообміну не буде відбуватися так само інтенсивно, а у кінцевому розчині буде спостерігатись різке збільшення іонів металів.

Аналогічно, знайдемо значення концентрацій іонів металів у розчині та витрати потоку, за яких буде спостерігатись максимальна ємність до просакування для органо-неорганічного іоніту (4). Оптимальне (максимальне) значення цільової функції дорівнює приблизно 995 за умови, що $x_1 = -0,6753$; $x_2 = 1$; $x_3 = 1$; $x_4 = -1$. Якщо кодовані значення факторів перевести у натуральний вигляд, то розв'язок задачі оптимізації запишеться таким чином: при значенні концентрації $[\text{Ca}^{2+}] = 0,6347$ ммоль/л; $[\text{Mg}^{2+}] = 1$ ммоль/л; $[\text{Ni}^{2+}] = 2$ ммоль/л; витраті $v = 30$ мл/хв можна ефективно очистити 995 мл

розчину від іонів Ni^{2+} та іонів жорсткості до настання просакування. Після очищення даного об'єму розчину процес іонообміну не буде відбуватися так само інтенсивно, а у кінцевому розчині буде спостерігатись різке збільшення іонів металів.

Знайшовши оптимальні значення для обох іонітів, можна зробити висновок про те, що ефективнішим є органо-неорганічний іоніт, який дозволяє очистити більшу кількість розчину від іонів металів приблизно на 100 мл.

9. Висновки

Шляхом дослідження іонообмінного вилучення Ni^{2+} з комбінованих розчинів, що містять також іони жорсткості, розв'язана задача створення формалізованої моделі іонного обміну з використанням мінімальної кількості варійованих параметрів. Обмін вивчали на прикладі іонообмінної смоли і органо-неорганічного іоніту на її основі. Встановлено емпіричні залежності ємності до просакування. Співставлення результатів, отриманих за розрахунками за моделлю та експериментальних досліджень, показало можливість використання розроблених моделей для практичних задач. Використовуючи отримані моделі можна не проводячи експерименту отримати значення ємності до просакування для кожного іоніту та обрати кращий із них.

Отримані моделі після верифікації в перспективі можуть бути використані для розрахунку іонообмінних і сорбційних процесів, спрямованих на вилучення з комбінованого розчину того чи іншого компонента.

Література

1. Helfferich, F. Ion Exchange [Text] / F. Helfferich. — New York, USA: Dover, 1994. — 624 p. doi:10.1039/9781847551184
2. 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
3. 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
4. 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. doi:10.1134/s0036024412060088
5. Spellman, F. R. Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations [Text] / F. R. Spellman. — Boca Raton: CRC Press, 2008. — 521 p. doi:10.1201/9781420075311
6. 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.cep.2008.05.001
7. Аширов, А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов [Текст] / А. Аширов. — Л.: Химия, 1983. — 295 с.
8. Сенявин, М. М. Ионный обмен в технологии и анализе неорганических веществ [Текст] / М. М. Сенявин. — М.: Химия, 1980. — 272 с.
9. Рузинов, Л. П. Планирование эксперимента в химии и химической технологии [Текст]: учеб. пособие / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчикова. — М.: Химия, 1980. — 280 с.
10. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст]: учеб. пособие / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. — М.: Высшая школа, 1978. — 319 с.

11. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии [Текст]: учеб. пособие / А. Г. Бондарь, Г. А. Статуха, И. А. Потяженко. — К.: Вища школа, 1980. — 264 с.
12. Бродский, В. З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей [Текст]: справочное издание / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова. — М.: Металлургия, 1982. — 753 с.
13. Афонин, Г. Г. Моделирование обмена Ni²⁺ на сильнокислотной ионообменной смоле и органо-неорганическом ионите [Текст] / Г. Г. Афонин, Ю. А. Безносик, Ю. С. Дзязько, Л. Н. Пономарева // Технологический аудит и резервы производства — 2015. — № 2/4(22). — С. 63–67. doi:10.15587/2312-8372.2015.40640
14. 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. Volkovich, V. V. Trachevskii, A. V. Palchik // Microporous and Mesoporous Materials. — 2014. — Vol. 198. — P. 55–62. doi:10.1016/j.micromeso.2014.07.010
15. 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.
16. Статуха, Г. О. Вступ до планування оптимального експерименту [Текст]: навч. посіб. / Г. О. Статуха, Д. М. Складанний, О. С. Бондаренко. — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — 124 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОНОВ НИКЕЛЯ ИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ

Исследовано извлечение ионов Ni²⁺ из комбинированного раствора с использованием сильнокислотной гелевой катионообменной смолы и композиционного ионита на ее основе, содержащего агрегаты наночастиц гидрофосфата циркония. С помощью планирования эксперимента получены модели процесса извлечения ионов Ni²⁺ из раствора с помощью полимерного и органо-неорганического ионита.

Ключевые слова: ионообмен, очистка воды, ионы никеля, кальция, магния, математическая модель, планирование эксперимента.

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

Складанний Денис Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Бондаренко Олена Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Афонин Геннадий Геннадиевич, кафедра кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Безносик Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Дзязько Юлия Сергеевна, доктор химических наук, старший научный сотрудник, отдел сорбционных и мембранных материалов и процессов, Институт общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского НАН Украины, Киев, Украина.

Складанний Денис Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Бондаренко Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Afonin Gennadiy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

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.

Skladannyi Denis, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Bondarenko Olena, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

УДК 664.8.022.7

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.58826

**Терешкін О. Г.,
Горелков Д. В.,
Дмитревський Д. В.**

ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОВОЧІВ ПІД ЧАС ЇХ ОЧИЩЕННЯ

Запропоновано математичну модель процесу термічної обробки овочів під час їх очищення, яка характеризує залежність глибини провареного шару овочів від тривалості процесу їх термічної обробки та тиску пари, та доведено, що за умов обробки гострою парою час досягнення максимальної температури поверхні продукту не впливає на загальну тривалість процесу проварювання.

Ключові слова: термічна обробка, тиск пари, проварювання, якість, витрати, очищення.

1. Вступ

Для вирішення проблеми переробки сільськогосподарської сировини необхідно розробляти технічні засоби не тільки для промислової переробки сільськогосподар-

ської сировини, а і налагоджувати випуск малогабаритної техніки для закладів ресторанного господарства.

На сьогоднішній день відповідальнішим процесом попередньої обробки овочевої сировини є її очищення. Безперечним є той факт, що під час очищення значна