

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 519.688

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/09>**Абрамова А.О.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ПРОЕКТУВАННЯ ІОНООБМІННИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У MATLAB

У статті розглянуто процес очищення стічних вод методом іонного обміну. Цей метод є розповсюдженим через можливість проводити утилізацію кошових домішок і забезпечувати очищення до гранично допустимих концентрацій. Проаналізовано та виділено основні процеси, що відбуваються при очищенні стічних вод на основі іонообмінних процесів. Складені такі математичні моделі: процесу сорбції в іонообмінному фільтрі, процесу регенерації іоніту, процесу відмивання на підставі аналізу існуючих математичних моделей процесів, що функціонують у іонообмінних системах. Обрано метод прогону як метод розрахунку коефіцієнтів моделей без проведення експерименту. Розроблено програмний комплекс з метою автоматизації проектування складових іонообмінних процесів очищення стічних вод. Програмний комплекс створено з використанням *m*-сценаріїв у системі *Matlab*. Специфіка роботи програмного комплексу полягає у взаємодії з користувачем у консольному діалоговому режимі. Для розрахунку користувач повинен завчасно підготувати файли даних, опис формату яких надається програмою, після цього вказати ці файли на початку роботи у головному вікні програмного комплексу. Виконано розрахунок вузла іонообмінного очищення продувних і поверхневих стічних вод. Розглянуто технологічну схему робочої лінії по очищенню продувних стічних вод. Кожна лінія являє собою наступні послідовно з'єднані апарати: механічний зернистий фільтр, *H*-катіонітовий фільтр, декарбонізатор з баком для декарбонізованої води та *ОН*-аніонітовий фільтр. В результаті розрахунків сформовано зведені таблиці основних показників фільтрів досліджуваної технологічної схеми робочої лінії. Отримано розподіл концентрації іонів у воді по висоті колони на виході з кожного фільтру у графічному та числовому вигляді. У статті представлено результати для *H*-катіонітового фільтру.

Ключові слова: іонний обмін, іонообмінний фільтр, сорбція, регенерація, очищення стічних вод, автоматизація, математичне моделювання.

Постановка проблеми. Очищення стічних вод є обов'язковим елементом сучасних хімічних виробництв і підприємств, що мають цехи хімічного профілю. Вибір методів очищення стічних вод залежить від вимог до якості очищення, типу домішок та сфери подальшого використання оброблених стоків. Очищення стічних вод методом іонного обміну одержало широке поширення, тому що цей метод дає змогу утилізувати кошові домішки і забезпечує очищення до гранично допустимих концентрацій [1]. Метод іонного обміну досить добре вивчений по фізико-хімічній природі. Однак існуючі методи проектування практично не використовують потенціалу накопиченої науково-дослідної інформації [2]. З однієї сторони не формалізовані результати багатьох досліджень

не дозволяють їх безпосередньо використовувати в проектних розробках, а з іншого боку – існуюча практика проектування виключає таку можливість.

Комп'ютеризація інженерної праці в області проектування дозволяє системно зберігати, аналізувати і використовувати величезний науково-практичний матеріал з метою розроблення якісних проектів у разі створення нових і реконструкції діючих схем очищення стічних вод.

Використовувані проектувальниками наближені методи розрахунку не дозволяють провести оптимізацію режимів функціонування окремого устаткування і технологічних схем у цілому на стадії проектування. Цю задачу дозволяють вирішувати методи математичного моделювання, що через обсяги проведених розрахунків безпосередньо

пов'язані з впровадженням обчислювальної техніки в процес проектування. У зв'язку з цим задача розроблення програмного комплексу проектування іонообмінних систем очищення стічних вод є **актуальною**.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш розповсюдженими для організації процесу іонного обміну в системах очищення стічних вод з метою коректування сольового складу чи демінералізації є іонообмінні фільтри. Вони характеризуються високими надійністю і продуктивністю, завантажуються, як правило, зернистими іонами. З їхньою допомогою здійснюються різні методи іонування при спадному і висхідному потоках води, що очищаються [3, 4]. Аналізування існуючих способів технологічної організації коректування сольового складу оборотних і стічних вод дозволив виділити, як найбільш розповсюджений, іонообмінний апарат з нерухомим шаром іоніту (іонообмінний фільтр). Основними складовими стадіями (процесами) його функціонування є: сорбція (видалення домішок приготуванням іонітом), розпушення шару іоніту, регенерація відпрацьованого іоніту і відмивання від продуктів регенерації і надлишку регенераційного розчину.

Аналізуючи математичні моделі опису сорбції авторами [5, 6] доведено, що найбільш характерною особливістю динаміки обміну сумішей є витіснення менш сорбованих компонентів більш сорбованими, що обумовлене розходженням у їх сорбованості, у результаті чого швидкість руху фронтів усіх компонентів суміші, крім найбільше сорбованого, при обміні в суміші стає більше, ніж швидкість руху кожного з цих іонів при індивідуальному обміні (якщо концентрації іонів при індивідуальному обміні і при обміні в суміші рівні). У результаті розходження у швидкостях руху відбувається поділ суміші, що виявляється в утворенні декількох зон. Авторами [7, 8] встановлено, що значення правильного прогнозування умов регенерації іонітів в іонообмінних системах очищення стічних вод важко перебільшити. Виділено кілька факторів, що це підтверджують: по-перше, оскільки іонообмінні фільтри – апарати, як правило, періодичної дії і час регенерації визначає (разом з міжрегенераційним періодом) час нормальної експлуатації; по-друге, якість регенерації значною мірою визначається типом забруднюючих домішок (тих, що нагромадив іоніт) і кількістю утриманої порами іоніту води; по-третє, значний вплив на ступінь регенерації робить і сам регенераційний розчин, що був обраний, а це обумовлює

і термін роботи іоніту і якість води, що очищається. Процес відмивання найменш вивчений, проте в роботі [9] представлена математична модель процесу відмивання, побудована на припущенні про водяну адсорбцію з опуклою ізотермою, а основна розрахункова залежність визначає час відмивання, після закінчення якого у фільтраті з'являється якась концентрація електроліту. Проведений аналіз існуючих математичних моделей досліджуваних процесів дає змогу сформулювати алгоритм програмного комплексу проектування іонообмінних систем очищення стічних вод.

Метою статті є розроблення програмного комплексу проектування іонообмінних систем очищення стічних вод на основі сформованих математичних моделей процесів у іонообмінних системах.

Виклад основного матеріалу. Іонний обмін є різновидом рідинної адсорбції, тому при розрахунку процесу іонного обміну доцільно використати прийоми й принципи адсорбції. Іонний обмін використовується для очищення стічних вод різних хімічних виробництв, а також для вилучення індивідуальних іонів кольорових металів з наступним їхнім поверненням на повторне використання [9].

В схемах іонообмінного очищення можна виділити три основних вузла іонообмінного очищення стічних вод: катіонування, декарбонізація, аніонування.

У роботі розглядається принципова технологічна схема робочої лінії, що представлена на рис. 1 [10]. Запропонована технологічна схема враховує особливості компонентного складу води, що надходить на очищення.

Станція знесолення продувних і поверхневих стічних вод продуктивністю 300 м³/год (2,3 млн. м³/рік) включає чотири технологічні лінії по 150 м³/год, з'єднані за блоковою схемою, і бакове господарство. Кожна лінія являє собою наступні послідовно з'єднані апарати: механічний зернистий фільтр, Н-катіонітовий фільтр, декарбонізатор з баком для декарбонізованої води та ОН-аніонітовий фільтр. З чотирьох ліній три робочі, одна знаходиться в резерві. У фільтри резервної лінії іоніти не завантажені, натомість передбачена можливість гідравлічного перевантаження іонітів з робочих фільтрів у резервні [11]. Знесолення стічних вод здійснюється безупинно на двох із трьох робочих ліній, третя в цей час регенерується. Іонообмінний вузол призначений для очищення продувних і поверхневих стічних вод з характерним вмістом наступних домішок.

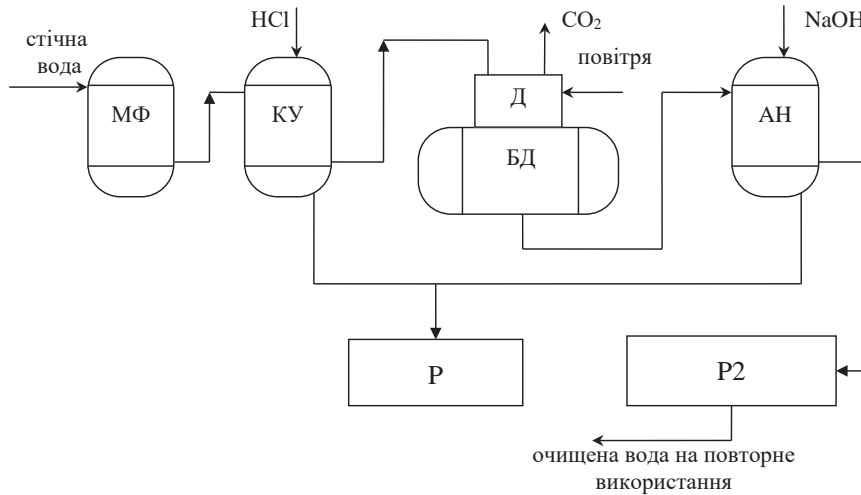


Рис. 1. Технологічна схема робочої лінії по очищенню продувних стічних вод: МФ – механічний зернистий фільтр; КУ – Н-катионітовий фільтр; Д – декарбонізатор; БД – бак для декарбонізованої води; АН – ОН-аніонітовий фільтр; Р – збірник елюатів; P2 – збірник очищеної води

Вибір моделі, що описує процес іонного обміну, залежить від наступних даних [7]:

- типу апарату, в якому здійснюється процес: апарат з нерухливим чи нерухливим шаром; з киплячим шаром і ін.;
- характеристик домішок, що підлягають видаленню, чи компонентів, необхідних до видалення із системи: неорганічні чи органічні сполуки; індивідуальний компонент чи суміш і ін.;
- тип використовуваного іоніту: зернистий, гранульований, порошкоподібний, волокнистий і ін.; катіоніт, аніоніт, змішаної дії й ін.

Визначальним моментом при виборі типу іоніту є характеристика середовища, що очищається, і здатність обраного іоніту «працювати» у створюваних умовах (вплив рН середовища, температури, гідралічного навантаження, регенерації).

Формування математичної моделі процесу сорбції в іонообмінному фільтрі. Оскільки в практиці очищення стічних вод (глибока демінералізація) найчастіше використовується контроль по натрій-іону і хлору-іону, то імітація сорбції проходить по однокомпонентному механізму. Безумовно, це відноситься до випадку, коли в системі не протікає ніяких хімічних реакцій, крім іонного обміну, що може розглядатися, як процес масообміну з високим значенням коефіцієнта масопередачі [7]. Якщо в іонообмінному процесі беруть участь три і більше іонів, що знаходяться в рідкій і твердій фазах, то відповідно до гіпотези Нікольського Б. П. і Гапона Є. М. обмін будь-якої пари іонів протікає незалежно від інших іонів, що є присутніми у системі. Таким чином, приймаючи

за основу однопараметричну дифузійну модель для рідкої фази і з огляду на те, що процес відбувається з високим значенням коефіцієнта масо передачі, математичний опис процесу сорбції на іоніті включає наступні рівняння [11]:

– процес переносу речовини в рідкій фазі (воді):

$$D_{11} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \beta_1 (c - c^*) = \varepsilon \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (1)$$

– процес переносу речовини у твердій фазі (іоніті):

$$D_2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \beta_1 (c - c^*) = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial a}{\partial t}, \quad (2)$$

– рівновага в системі (ізотерма Нікольського):

$$\frac{a_i^{1/z_i}}{a_j^{1/z_j}} = K_{ij} \frac{c_i^{1/z_i}}{c_j^{1/z_j}}. \quad (3)$$

Система рівнянь (1)–(3) доповнена наступними початковими і граничними умовами по рідкій і твердій фазах відповідно:

$$\begin{aligned} x = 0: & \quad D_{11} \frac{\partial c}{\partial x} = v(c - c_o); \quad D_2 \frac{\partial a}{\partial x} = \beta_2 (a - a^*); \\ x = L: & \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial a}{\partial x} = 0 \\ t = 0: & \quad c = c_o; \quad a = a_o; \end{aligned} \quad (4)$$

а також рівняннями зв'язку, що враховують еквімолярність системи (за умови електронейтральності рідкої фази):

$$\sum_{i \neq j}^n c_{ij} = c_o; \quad \sum_{i \neq j}^n a_{ij} = A; \quad (5)$$

де: a, c – концентрація іонів (сумарний утримання) в іоніті і воді відповідно, мг-екв/мл; $a_o,$

c_o – початкова концентрація іонів в іоніті і воді відповідно, мг-екв/мл; a^* , c^* – рівноважна концентрація іонів в іоніті і воді відповідно, мг-екв/мл; A – динамічна обмінна ємність іоніту, мг-екв/мл; D_{11} – ефективний коефіцієнт подовжньої дифузії в рідкій фазі, м²/год; D_2 – ефективний коефіцієнт дифузії домішок у пористому середовищі, м²/год; K – концентраційна константа обміну для ізотерми Нікольського; β_1 – коефіцієнт зовнішнього масопереносу, 1/год; β_2 – коефіцієнт внутрішнього масопереносу, 1/год; x – координата (початок відліку – місце введення води, що очищується, $0 \leq x \leq L$), м; L – довжина (висота) шаруючи іоніту, м; t – час ($0 \leq t \leq T$), год; T – міжрегенераційний період (корисний час процесу), год; ε – пористість шару іоніту (для стандартних промислових іонітів = 0.4); v – приведена швидкість плинину рідини у фільтрі, м/год; j – індекси обмінюваного й обмінюючого іонів.

При складанні математичного опису шар іоніту розглядався як рівномірно розподілені по довжині мікро- і макро-пористі зони. Тому гідродинаміка і була описана рівнянням однопараметричної дифузійної моделі (1), а інтенсивність масопереносу в мікропористих зонах рівнянням (2) аналогічним за формою рівнянню дифузії Фіка. Основними параметрами математичного опису (1)–(5) є: ефективний коефіцієнт подовжньої дифузії (D_{11}), ефективний коефіцієнт дифузії сорбованого компонента у твердій фазі (D_2), коефіцієнт масопередачі (β_1), константа іонного обміну (K) [13].

Розрахунок коефіцієнта зовнішнього масопереносу здійснювався по залежності (6):

$$\beta_1 = \frac{Nu \cdot D_o}{d_r^2}, \quad (6)$$

Значення коефіцієнта внутрішнього масопереносу визначається за емпіричною корелюючою залежністю [12] (з урахуванням одиниць виміру):

$$\beta_2 = \frac{0.168 \cdot D_2}{d_r^2} \quad (7)$$

Формування математичного опису процесу регенерації іоніту. Для розгляду процесу регенерації використовуємо наступну схему: шар іоніту складається з часток іоніту, що утримують вилучені зі стічної води домішки, а вільний простір між ними заповнено чистою водою (результат розпушуючого промивання). Безпосередньо в регенерації варто виділити наступні моменти: розведення регенераційного розчину залишками промивної води, безпосередньо регенерація, віднесення продуктів регенерації. Виходячи з вищевикладеного, модель регенерації іоніту з урахуванням розведення регенераційного розчину включає наступні рівняння [7]:

$$\frac{\partial C_{Ro}}{\partial t} = T_R (C_{Rex} - C_{Ro}); \quad (8)$$

$$D_R \frac{\partial^2 C_R}{\partial x^2} - v_R \frac{\partial C_R}{\partial x} - \beta_R (C_{Ro} - C_R^*) = \varepsilon \frac{\partial C_R}{\partial t}; \quad (9)$$

$$D_{ef} \frac{\partial^2 a_R}{\partial x^2} + \beta_R (C_{Ro} - C_R^*) = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{\partial a_R}{\partial t}; \quad (10)$$

$$C_R^* = k a_R^n \quad (11)$$

Граничні і початкові умови :

$$x = 0 : D_R \frac{\partial C_R}{\partial x} = v_R (C_{Rex} - C_R); \quad D_{ef} \frac{\partial a_R}{\partial x} = \gamma (a_R^* - a_R);$$

$$x = L : \frac{\partial C_R}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial a_R}{\partial x} = 0; \quad (12)$$

$$0 < x < L : C_{Rex} = C_R^*;$$

$$t = 0 : C_R = C_{Ro} = C_{Rex}; \quad a_R = 0;$$

де T_R – параметр розведення розчину, 1/год; D_R , D_{ef} – ефективні коефіцієнти дифузії в рідкій і твердій фазах, м²/год; v_R – приведена швидкість руху регенераційного розчину, м/год; β_R , γ – коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього масопереносу, 1/год; k , n – константи ізотерми; C_{Rex} , C_{Ro} – концентрація регенераційного розчину на вході у фільтр, після розведення водою з міжфазного простору, г-екв/л; C_R , a_R – концентрація регенераційного розчину в рідкій і твердій фазах.

Таким чином рівняння (8)–(12) описують математичну модель регенерації іоніту в іонообмінному фільтрі.

Формування математичного опису відмивання іоніту. Технологічно відмивання іоніту проводять після регенерації, причому використовується частина очищеної води, призначеної для власних потреб іонообмінних фільтрів. При цьому видаляється надлишок регенераційного розчину з міжіонітного простору, утримуваний іонітом.

Приймаючи модель запропоновану у [7] за основу, враховуючи також, що вода, що подається на відмивання має домішок електроліту, одержуємо залежність, що дозволяє розрахувати вихідну концентраційну криву:

$$D_{ж,о} C(t) = C_o e^{(k_{om}-1)t} [1 + \beta_o (\frac{L}{V_o m} - \frac{C_o}{a_o} t)] \quad (13)$$

де C , $C_{вх}$, C_o – концентрація електроліту на виході, у промивній воді, у регенераційному розчині, г-екв/куб.дм; t – час відмивки, г; L – висота шару іоніту, м; V_{om} – приведена швидкість відмивки км/год; β_o – коефіцієнт масопередачі, 1/год; a_o – повна обмінна ємність, г-екв/куб.дм; k_{om} – константа обміну.

Доповнюючи рівняння (13) розрахунком основного параметра процесу, коефіцієнта масопередачі, відповідно до рекомендації [13], і привівши розрахункові формули до одиниць, прийнятим у роботі, одержуємо наступні залежності:

$$\beta_0 = 16,667 \frac{1 - \varepsilon}{d_r^2 m} D_r S_h$$

$$Sh = 2 + \frac{A(Re \cdot Pr)^{1.7}}{1 + (Re \cdot Pr)^{1.2}} = 2 + \frac{0,66}{[1 + (0,84 + Sc^{1/6})^3]^{0,33}} \quad (14)$$

$$Re = 0,278 \cdot \frac{d_r V_{om}}{\eta}$$

де – S_h критерій Шервуда.

Залежність (13) справедлива в інтервалі $0 \leq Re < 3 \cdot 10^5$ і $0 \leq Pr < \infty$.

Для рішення математичних моделей (1)–(14) був обраний метод прогону, який одержав широке поширення у разі рішення систем різницевих рівнянь, що виникають при апроксимації крайових задач для диференціальних рівнянь другого порядку [14]. Метод прогону являє собою варіант методу послідовного виключення невідомих.

За сформованою системою математичних моделей іонообмінних процесів очищення стічних вод та обраним методом їх вирішення з метою автоматизації процесу проектування вузла іонообмінного очищення стічних розроблено програмний комплекс на мові m-сценаріїв у системі Matlab [15]. Взаємодія з користувачем відбувається у консольному діалоговому режимі. Користувач має завчасно підготувати файли даних, опис формату яких надається програмою, після цього вказати ці файли програмі.

Головне вікно програмного комплексу представлено на рис. 2.

Обираємо файли з підготовленими даними для розрахунку: «Характеристики вхідного потоку», «Початкові дані», «Діаметри фільтрів» (рис. 3).

По завантаженні даних з обраних файлів проводиться розрахунок, виводиться на екран і результат зберігається у файл звіту.

Проведено розрахунок процесу іонного обміну в нерухомому прошарку (вихідні дані для розрахунку представлено у таблиці 1, рис. 1).

Таблиця 1

Вихідні дані

Найменування	Одиниці виміру	Значення
Витрата води, що очищується	м ³ /год	150
Необхідна лінійна швидкість	м/год	15
Кращий міжрегенераційний період	год	12
Діаметри фільтрів	м	3.4
Іоніт		КУ-2-Н
Розрахункова обмінна ємність	мг-екв/мл	1.2
Концентрація домішок на вході:		
– в іоніті	мг-екв / мл	0
– у воді	мг-екв / мл	0.018
Припустима у воді концентрація на виході	мг-екв / мл	0.002
Регенерація розчином		HCL
Концентрація регенераційного розчину	%мас.	5
Кратність (еквіваленту) питомої витрати	б/р	2.5

В результаті виконання програми отримано: значення лінійної швидкості, концентрації іонів на вході і виході, кількість регенерацій, між регенераційний період, витрата регенераційного

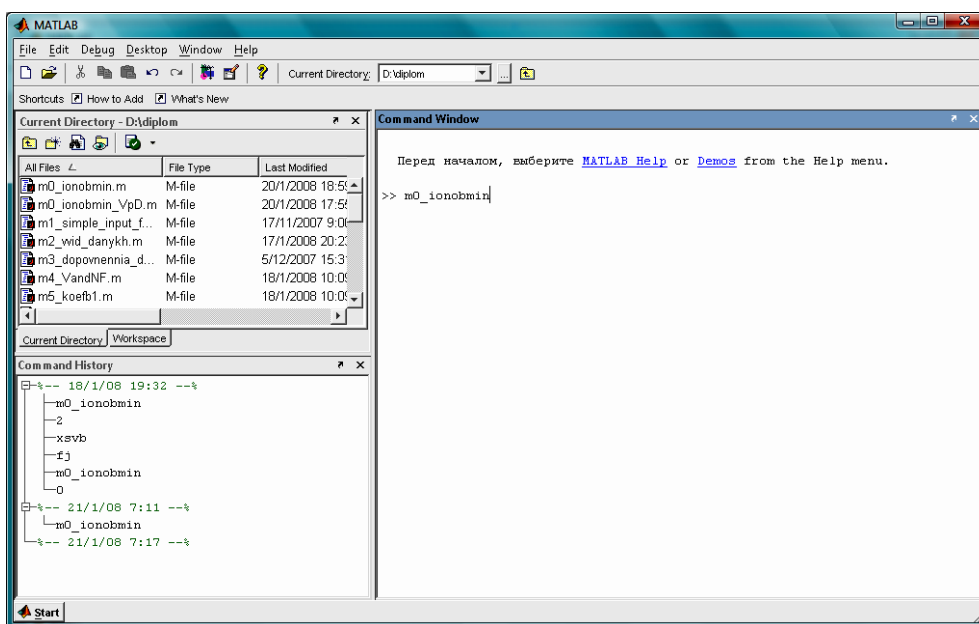


Рис. 2. Головне вікно програмного комплексу

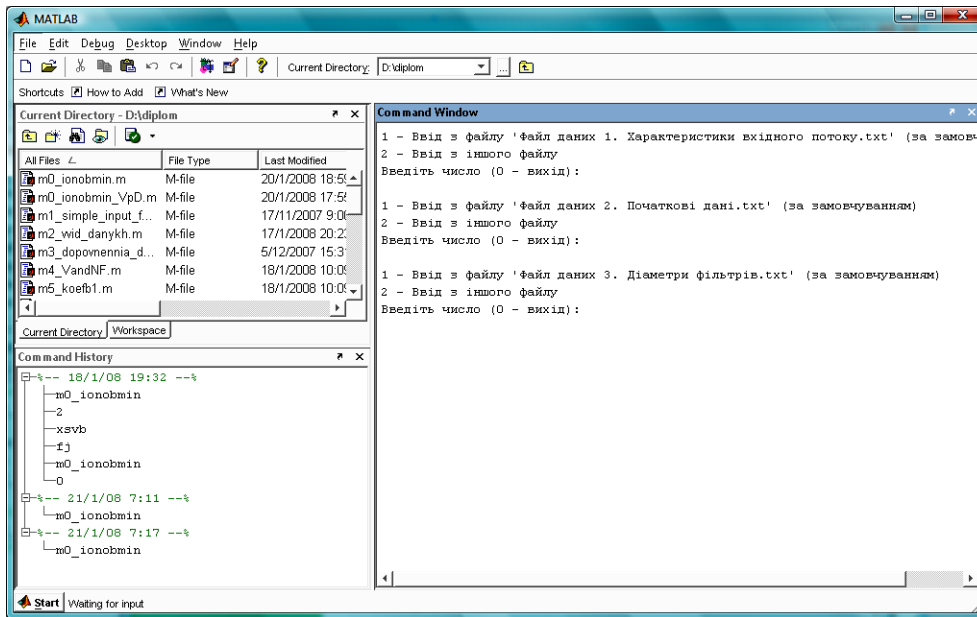


Рис. 3. Вікно введення характеристик вхідного потоку, початкових даних і діаметрів фільтру

Таблиця 2
Розподіл концентрації іонів у воді по висоті колони на виході з Н-катионітового фільтру

Висота, м	Концентрація в іоніті	
	С _{вих.} , г-екв/дм ³	
0	1.199801	0.017997
0.8	1.196389	0.017939
1.2	1.16779	0.017445
1.6	1.031	0.015118
2	0.683366	0.009573
2.4	0.284128	0.003793
2.65	0.156619	0.001985

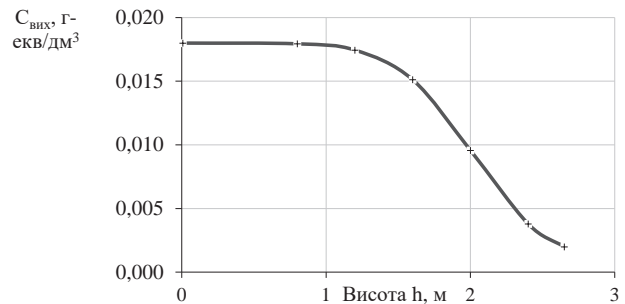


Рис. 5. Розподіл концентрації іонів у воді по висоті колони на виході з Н-катионітового фільтру

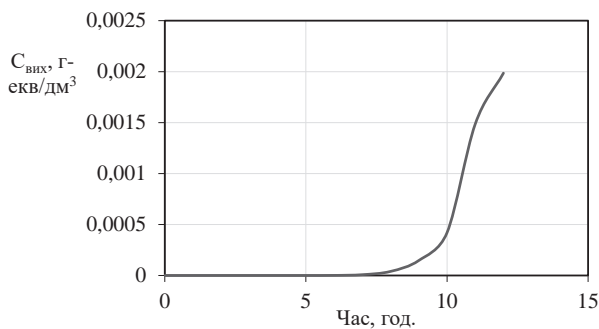


Рис. 4. Залежність концентрації іонів на виході з Н-катионітового фільтру від часу його роботи

розчину, гідравлічний опір шару, добова витрата води на 1 регенерацію, кількість очищеної води, швидкість, час для кожного фільтра робочої лінії.

Розраховано розподіл концентрації іонів на виході з фільтрів від часу роботи та по висоті

апарату. Результати розрахунку розподілу концентрації іонів у воді по висоті колони на виході з Н-катионітового фільтру представлено у таблиці 2, рис. 4, рис. 5.

Розроблений програмний комплекс проектування та розрахунку систем іонообмінного очищення стічних вод має практичне значення і може використовуватись у передпроектних розрахунках підприємств.

Висновки. Проведено аналізування процесу функціонування іонообмінного фільтра як найбільш розповсюдженого апарату для промислової організації процесу очищення стічних вод. У дослідженні виділені основні процеси, що потребують формування математичної моделі: сорбція, розпушення і пропуск регенераційного розчину, відмивання від продуктів регенерації і надлишку регенераційного розчину. На підставі аналізу існуючих

математичних моделей процесів, що функціонують у іонообмінних системах, запропоновано математичні моделі процесу сорбції в іонообмінному фільтрі, процесу регенерації іоніту, процесу відмивання іоніту. Розроблено програмний комплекс

проекування та розрахунку систем іонообмінного очищення стічних вод у системі Matlab. Із використанням програмного комплексу виконано розрахунок вузла іонообмінного очищення продувних і поверхневих стічних вод для підприємства.

Список літератури:

1. Петрук В. Г., Северин Л. І., Васильківський І. В., Безвозюк І. І. Природоохоронні технології. Навчальний посібник. Ч.2: Методи очищення стічних вод. Вінниця: ВНТУ, 2014. 258 с.
2. Мінаєва В. О. Іонний обмін та іонообмінна хроматографія. Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2013. 128 с.
3. Ковальчук В. А. Очистка стічних вод. Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
4. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод / Під заг.ред. А.К. Запольського. К.: Лібра, 2000. 551 с.
5. Буртна. І. А., Ружинська Л. І., Мурашко М. М., Руденко Л. С. Математична модель процесу сорбції полімерними мембранними елементами рідких органічних речовин // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. № 6(6). С. 19-23.
6. Сорбція. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш; за заг. ред. Р. А. Шмига. Львів, 2010. 181 с.
7. Конспект лекцій з дисципліни „Перспективні хімічні технології” для студентів спеціальності 6.091602 – Хімічна технологія неорганічних речовин./ Укладач: Черненко Я. М. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2012. 85 с.
8. Трофіменко М. О., Конспект лекцій з дисципліни «Технологія очищення стічних вод». Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010. 118 с.
9. Староста В. І., Янчук О. М. Колоїдна хімія. Практикум: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Луцьк: Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2014. 360 с.
10. Гіроль, М. М., Гіроль, А. М., Гіроль, А. М. *Технології водовідведення промислових підприємств*. НУВГП, Рівне. 2013. 625 с
11. Айрапетян Т. С. Технологія очистки промислових стічних вод : конспект лекцій, Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 73 с.
12. Сабадаш В.В. Теоретичні основи сорбційних процесів на природних та синтетичних сорбентах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08, Львів, 2019. 472 с.
13. Чуб І. М. Масообмінні процеси водопідготовки: навч. посібник. Харків. нац. ун-т міськ. гос-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 161 с.
14. Гой Т. П., Копач М. І., Федак І. В. Наближені методи розв'язування диференціальних рівнянь. Навчальний посібник для студентів напрямів підготовки “математика” та “прикладна математика”. Івано-Франківськ: Видавничо-дизайнерський відділ Центру інформаційних технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. 148 с.
15. Гаєв Є. О., Нестеренко Б. М. Універсальний математичний пакет MATLAB і типові задачі обчислювальної математики. Навчальний посібник. К.: НАУ, 2004. 176 с.

Abramova A.O. DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE COMPLEX FOR THE DESIGN OF ION-EXCHANGE SYSTEMS OF PURIFICATION OF WASTE WATER IN MATLAB

The article deals with the process of sewage treatment by ion exchange. This method is widespread due to the ability to dispose of precious impurities and provide cleaning to maximum permissible concentrations. The basic processes that occur when sewage treatment on the basis of ion-exchange processes are analyzed and isolated. The following mathematical models are drawn up: the process of sorption in ion-exchange filter; the process of ionite regeneration, the process of laundering on the basis of the analysis of existing mathematical models of processes operating in ion-exchange systems. The method of runs was chosen as a method of calculating the coefficients of models without conducting the experiment. The software complex has been developed in order to automate the design of components of ion exchange processes of wastewater treatment. The software complex was created using m-scripts in the Matlab system. The specificity of the software complex is to interact with the user in the console dialog mode. To calculate, the user must prepare the data files in advance whose description of the format is provided by the program, then specify these files at the beginning of work in the main window of the software complex. The calculation of the ion-exchange purification of purging and surface wastewater was calculated. The technological scheme of the working line for treatment of purging wastewater is considered. Each line is the following sequentially connected apparatus: mechanical granular filter, H-kationite filter; decarbonizer with a decarbonized water tank and OH-anionite filter. As a result of the calculations, summary tables of the main indicators of the filters of the studied technological scheme of the work line were formed. The distribution of concentration of ions in water by the height of the column at the exit of each filter in graphic and numerical form was obtained. The article presents the results for the N-kationite filter.

Key words: ion exchange, ion-exchange filter, sorption, regeneration, wastewater treatment, automation, mathematical modeling.