

628.3(043)
ПЗІ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

ПЕТРУШКА КАТЕРИНА ІГОРІВНА

УДК 628.316.12:66.021.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ АДСОРБЦІЙНО - ІОНООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ
ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ТА ШАХТНИХ ВОД**

21.06.01 – Екологічна безпека

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2017



Дисертація є рукопис.

Робота виконана у Національному університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
МАЛЬОВАНІЙ Мирослав Степанович,
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, завідувач
кафедри екології та збалансованого
природокористування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ВОЛОШКІНА Олена Семенівна,
Київський Національний університет будівництва і
архітектури Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри охорони праці та навколишнього
середовища
кандидат технічних наук
СТОКАЛЮК Олег Володимирович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності Державної служби України з
надзвичайних ситуацій, начальник відділу заочного та
дистанційного навчання

Захист дисертації відбудеться « 23 » вересня 2017 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.

Автореферат надісланий « ____ » _____ 2017 року.

Учений секретар спеціалізованої вченої
Ради Д.20.052.05

К.О. Радловська.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна належить до найменш водозабезпечених держав Європи, оскільки запаси місцевих ресурсів річкового стоку на одну людину становлять близько 1,0 тис. м³ на рік. Основною причиною забруднення поверхневих вод є скидання неочищених та недостатньо очищених виробничих стічних вод. Особливо небезпечні стічні води ряду галузей промисловості (легкої, гірничовидобувної), які є не тільки високомінералізованими, але й містять високомолекулярні сполуки в значних концентраціях. У деяких гірничодобувних регіонах України відчувається дефіцит питної води, в той час як з підземних виробок у величезній кількості відкачуються шахтні води, скидання яких у поверхневі водойми створює негативний вплив на навколишнє середовище. Використання шахтної води допомогло б вирішити відразу дві проблеми: знизити її згубний вплив на довкілля і подолати дефіцит технічної води в небагатих водними ресурсами регіонах.

Одним із перспективних способів демінералізації стічних та шахтних вод є електродіаліз, за допомогою якого можливе знесолення та концентрування вод із солемістом до 12 000 мг/л із досягненням ступеня отримання чистої води до 94%, тобто вихідний розчин може бути сконцентрований майже в 20 разів. Важливо, що термін служби мембран є економічно привабливим та довготривалим.

Не менш економічно доцільним методом очищення від забруднень стічних та шахтних вод є адсорбційний із використанням природних сорбентів (цеолітів, глауконітів, бентонітів, палигорськітів). Перспективність використання природних мінералів у технологічних процесах очищення стоків зумовлена не тільки їх достатньо високою адсорбційною ємністю, але й існуванням ефективних методів покращення адсорбційних властивостей мінералів та природи їх поверхні модифікуванням, широким розповсюдженням в надрах України та промисловим розробленням великої кількості родовищ природних адсорбентів, невисокою вартістю мінералів. Відпрацьовані природні адсорбенти доволі часто не потребують регенерації (насичені вилученим компонентом сорбенти отримують нові якісні характеристики і часто можуть використовуватись в інших технологіях).

Тому дослідження, спрямовані на удосконалення адсорбційно-іонообмінних процесів очищення стічних та шахтних вод є актуальними і важливими для підвищення екологічної безпеки гідросфери.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри «Екології та збалансованого природокористування» і виконувалась згідно з тематикою науково-дослідницької роботи кафедри з проблеми «Адсорбційно-іонообмінні процеси очищення стічних та шахтних вод», № державної реєстрації 0117U004016 та «Очищення і утилізація змішаних стічних вод та забруднених водних середовищ біологічними, реагентними, коагуляційно-флотажними, адсорбційними та фізичними методами», № державної реєстрації 0117U004017 Національного університету "Львівська політехніка"

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня екологічної безпеки гідросфери шляхом удосконалення адсорбційних процесів очищення від забруднень природними сорбентами та процесів обезсолювання із застосуванням електродіалізу з цілпо очищення стічних та шахтних вод.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз екологічної небезпеки від забруднення довкілля стічними та шахтними водами;

- встановити залежність механізму процесів сорбції від характеристики розподілу діаметру пор природних та модифікованих сорбентів;
- дослідити методи прогнозування сорбційних процесів, в яких використовуються природні сорбенти;
- встановити умови інтенсифікації процесів зовнішньої дифузії (на прикладі сорбції іонів стронцію композиційним сорбентом);
- дослідити умови інтенсифікації відділення відпрацьованого сорбенту від очищених стоків із використанням флокулянтів;
- дослідити електропровідність іонообмінної смоли КУ-2, як міжмембранної засипки електродіалізерів в системах «іонообмінна смола – розчин NaCl» та «іонообмінна смола – розчин NH_4Cl »;
- встановити механізм перенесення струму в іоніті та розробити математичну модель процесу;
- розробити ефективну комплексну технологічну схему очищення стічних та шахтних вод із застосуванням процесу сорбції та електродіалізу із міжмембранною засипкою іонітом.

Об'єкт дослідження – процеси зниження рівня екологічної небезпеки від скиду забруднених стічних та шахтних вод в поверхневі водойми.

Предмет дослідження – очищення стічних та шахтних вод від забруднень природними сорбентами та знесолення цих вод методом електродіалізу.

Методи досліджень включають в себе розроблені методики експериментальних досліджень, хімічні методи визначення концентрацій. Електрохімічні методи: кондуктометричне визначення електропровідності розчинів. Структурний аналіз здійснювали рентгенофазовим методом, методом інфрачервоної спектроскопії. Площу питомої поверхні визначали методом BET. Обробку та візуалізацію експериментальних даних виконували за допомогою пакетів прикладних програм (Microsoft Excel; Statistica 7.0; Origin 8.0).

Наукова новизна одержаних результатів. З ціллю підвищення екологічної безпеки гідросфери дисертантом отримані такі найбільш важливі наукові результати:

1. Вперше для підвищення екологічної безпеки запропоновано проводити очищення високомінералізованих стічних та шахтних вод, забруднених одночасно хімічними (високомолекулярними та радіоактивними) забрудненнями за двохстадійною адсорбційно-електродіалізною схемою, що дозволило досягти високого ступеня очищення забруднених водних середовищ.

2. Вперше досліджено сорбцію іонів стронцію композиційним сорбентом та доведено, що максимальна ступінь поглинання характерна для внутрішньодифузійного режиму, що дозволило використовувати залежність критерію Шервуда від гідродинамічних режимів перемішування для прогнозування інтенсивності сорбційних процесів в динамічних умовах.

3. Вперше проведений аналіз параметрів розширеної трьохпровідної моделі провідності іонообмінної смоли КУ-2 в різній іонній формі, що дозволило прогнозувати процес демінералізації стічних та шахтних вод методом електродіалізу із міжмембранною засипкою іоніту.

4. Отримали подальший розвиток дослідження щодо залежності механізму сорбції від характеристик розподілу діаметру пор природних та модифікованих сорбентів та впливу гідродинамічних умов на процес адсорбції на дрібнодисперсній фракції сорбенту, який протікає в зовнішньодифузійній області, що дало можливість

більш селективно використовувати природні сорбенти у природоохоронних технологіях.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення експериментальних досліджень полягає розробленні та впровадженні методів інтенсифікації адсорбційних процесів очищення стічних вод від забруднень із використанням природних сорбентів, на які отримано позитивні рішення на 2 патенти України. Розроблено ефективну технологічну схему демінералізації стічних та шахтних вод із застосуванням електродіалізу із міжмембранною засипкою іонітом. Матеріали дисертаційних досліджень передано в ДП «Проектний центр ВАТ «Гірхімпром» для використання у проектуванні технологій очищення стічних та шахтних вод, що підтверджується відповідним актом. Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі НУ «Львівська Політехніка» для підготовки магістрів за спеціальністю «Екологія».

Особистий внесок здобувача. В дисертації узагальнені результати досліджень за період з 2012 по 2017 роки, в яких автор брав безпосередню участь. Наукові результати роботи базуються на дослідженнях, виконаних автором. Розробка завдань, формування мети й основних завдань досліджень, аналіз літературних джерел, вибір методів, методології досліджень, основний комплекс експериментальних робіт (постановка експериментів, їх виконання, статистична обробка отриманих експериментальних даних), теоретичні узагальнення, положення дисертації, аналіз та інтерпретація отриманих даних автором виконані самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві [4, 6, 10, 11], автору належить – проведення оцінки ефективності очищення водного середовища від барвників та радіоактивних елементів природними сорбентами, проведення експериментальних досліджень та розрахунків механізму сорбційного процесу, підготовка матеріалів до опублікування; [1, 7] - проведення та аналіз експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до опублікування, [3, 5, 8, 9] – дослідження впливу характеру розподілу пор природних сорбентів на степінь сорбції, розробка математичної моделі процесу, підготовка матеріалів до опублікування; [2] - проведення теоретичних досліджень та аналіз їх результатів, підготовка матеріалів до опублікування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на таких міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: II міжнародна науково-практична конференція „Стан природних ресурсів, перспективи їх збереження та відновлення”, 11 – 13 жовтня 2012 р., м. Дрогобич; V-й всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology-2015), 23 – 26 вересня 2015 р., м. Вінниця.; XIV Міжнародний науковий семінар «Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті», 29 червня – 3 липня 2015 р., м. Київ, оз. Світязь; II міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи», 4-6 листопада, 2015 р., Львів; I міжнародна науково-технічна конференція «Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг», - 4-6 листопада, 2015 р., Львів; міжнародна науково-практична конференція «Region - 2015: стратегія оптимального розвитку», 5-6 листопада 2015 р., Харків; міжнародна науково-практична конференція Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки, 4 грудня, 2015р., Харків; V міжнародний молодіжний науковий форуму “Litteris et Artibus”, 26–28 листопада 2015 р., м. Львів; Conference Proceedings international conference «Ion transport in organic and inorganic membranes» Krasnodar, 23 - 28 May 2016; 4-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища.

Енергоощадність. Збалансоване природокористування.» 21 – 23 вересня 2016 р., м. Львів; VI міжнародний молодіжний науковий форуму “Litteris et Artibus”, 24–26 листопада 2016 р., м. Львів; V міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 17-18 листопада 2016 р., м. Тернопіль.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 32 наукові праці: з них 1 розділ колективної монографії, 5 статей у виданнях, які входять до наукометричних баз даних, 5 статей у фахових виданнях, 19 публікацій у збірниках матеріалів конференцій, а також 2 позитивних рішення на видачу деклараційних патентів на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 181 сторінці машинописного тексту, ілюстровано 50 рисунками, текст містить 20 таблиць, у бібліографії наведено 230 літературних джерел, дисертація містить 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проблеми, яка вирішується у дисертаційній роботі, сформульовано мету та завдання дослідження, охарактеризовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості щодо апробації роботи.

Перший розділ присвячений аналізу науково-технічної літератури стосовно проблем адсорбційно - іонообмінного очищення стічних та шахтних вод, їхнього негативного впливу на довкілля. Проаналізовано переваги та недоліки сучасних методів очищення стічних та шахтних вод із використанням електродіалізу. На основі аналізу цієї інформації сформульовані цілі та завдання досліджень.

У **другому розділі** наведені характеристики матеріалів та об'єктів досліджень, методів та методик проведення експериментальних досліджень, описано експериментальні установки. Запропонована логічно-структурна схема дисертаційних досліджень. Здійснено опис та характеристику досліджуваних об'єктів, а саме стічних та шахтних вод та застосованих адсорбентів.

Запропонована методика порівняння експериментальних значень із теоретичними для внутрішньодифузійного процесу сорбції на основі ефективних коефіцієнтів внутрішньої дифузії, яка ґрунтується на загальноприйнятій у адсорбційних процесах методиці, і полягає у тому, що адсорбція відбувається в об'ємі рідини, який у масовому співвідношенні значно перевищує вміст твердої фази (сорбенту). Це означає, що у початковий момент часу концентрація забруднень у рідині змінюється незначно. Відповідно на початку процесу можна прийняти її постійною на поверхні зерна адсорбенту, а математичну задачу сформулювати як задачу дифузії із граничними умовами першого роду.

Розв'язком цієї задачі для внутрішньодифузійного процесу адсорбції за початкових ($\tau=0$; $C_0=0$) та граничних умов першого роду, із прийняттям допущення, що форма частинок сферична, є рівняння, що визначає зміну концентрації компоненту у рідкій фазі з часом:

$$\frac{c_1}{c_0} = 1 - \frac{1}{1 + \alpha} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha(1 + \alpha) \exp\left(-\mu_n^2 \tau\right)}{9 + 9\alpha + \alpha^2 \mu_n^2} \right], \quad (1)$$

де C_0 - початкова концентрація компоненту в розчині г/дм³; C_1 - концентрація компоненту у певний момент часу г/дм³; μ_n - додатні корені характеристичного рівняння; α - коефіцієнт заповнення пор.

За умови наближення процесу до рівноваги кінцеве значення концентрації компоненту у розчині має вигляд:

$$\frac{e_{ix}}{c_0} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (2)$$

Параметр τ - безрозмірна величина, яка є аналогом числа Фур'є - $Fo_o = \frac{D_m \cdot t}{R^2}$ та враховує фізичні і сорбційні параметри:

$$\tau = \frac{D_m \cdot t}{R^2} \cdot \frac{\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_p} \cdot \frac{C_0}{\rho_s q_0}, \quad (3)$$

де t - час сорбції, с; $D_{вн}$ - коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с; R - радіус частинки, м; ρ_s - густина твердої пористої фази, кг/м³; ε_p - пористість частинки, м³/м³.

Очевидно, що великим значенням часу відповідають низькі значення експоненти, тому, починаючи із деякого часу можемо знехтувати коренями характеристичного рівняння μ_n . Рівняння (1) можна подати у вигляді прямолінійної залежності:

$$\ln\left(\frac{C_1}{C_0} - \frac{\alpha}{1 + \alpha}\right) = \ln B - \mu^2 \tau. \quad (4)$$

За тангенсом кута нахилу прямої можна визначити ефективний коефіцієнт внутрішньої дифузії $D_{вн}$:

$$D_m = \frac{\lg \alpha R^2}{\mu_1^2} \cdot \frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \cdot \frac{\rho_s q_0}{C_0}. \quad (5)$$

Отримані результати експериментальних досліджень дають змогу визначити ефективні коефіцієнти внутрішньої дифузії процесу сорбції забруднень природними сорбентами у модифікованій формі та оцінити інтенсивність процесу адсорбції.

Для визначення параметрів зовнішньодифузійного процесу адсорбції забруднень природними та модифікованими сорбентами нами запропонована модель, яка ґрунтується на теорії локальної ізотропної турбулентності для апаратів із механічними перемішувальними пристроями у випадку розчинення твердих частинок, розміри яких перевищують товщину дифузійного пограничного шару, згідно якої розрахований теоретичний коефіцієнт масовіддачі:

$$\beta_m = 0,267 \cdot (\varepsilon_0 \cdot \nu)^{\frac{1}{4}} \cdot Sc^{-\frac{3}{4}}, \quad (6)$$

де ε_0 - питома енергія дисипації; ν - кінематична в'язкість рідини, м²/с; $Sc = \frac{\nu}{D}$ - число Шмідта; D - коефіцієнт дифузії забруднень в розчині, м²/с.

Коефіцієнт дифузії забруднень у розчині розраховували за залежністю Уїлкі та Чанга:

$$D_p = 7,4 \cdot 10^{-4} \frac{T(x \cdot M_{\text{води}})}{\mu \cdot \nu^{0,6}}, \quad (7)$$

де: T - температура, К; x - початкова концентрація забрудника у воді, г/дм³; $M_{\text{води}}$ - молекулярна маса води; μ - динамічний коефіцієнт в'язкості води, Па*с; ν - об'ємна молекулярна маса забрудника, см³/моль.

Величину питомого значення енергії дисипації в одиниці маси рідини (ε_0) та потужність на перемішування (N) визначали за відомими залежностями:

$$\varepsilon_0 = \frac{N}{\rho \cdot V} \quad (8)$$

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5, \quad (9)$$

де: K_N - коефіцієнт перемішування, який залежить від числа Рейнольдса; ρ - густина рідини, кг/м^3 ; d_m - діаметр мішалки, м; n - кількість обертів мішалки, 1/с.

Згідно із дослідженнями Л.Н. Брагінського, В.І. Богачова, В.М. Барабаша внаслідок радіальної сепарації твердих частинок спостерігається збільшення коефіцієнта масовіддачі порівняно із розрахунковим рівнянням (6). Теоретичні значення β порівнювались із визначеними експериментально.

Запропоновані математичні моделі процесу адсорбції, які ґрунтуються на розрахунку зовнішньо - та внутрішньодифузійних параметрів, дають змогу визначити лімітуючу стадію адсорбції, що дає можливість підвищити ступінь поглинання забруднень із стічних вод.

Для очищення сильномінералізованих стічних та шахтних вод описано методики дослідження іонообмінних процесів із використанням модельних розчинів хлориду натрію та з хлориду амонію.

Третій розділ присвячено аналізу екологічної небезпеки, яку спричиняють забруднення гідросфери стічними та шахтними водами. Проведений аналіз забруднення довкілля стічними та шахтними водами Нововолинського гірничопромислового району та перспективні технології їх очищення.

Встановлено, що практично всі поверхневі та значна частина підземних водних ресурсів, особливо в районах розташування потужних промислових комплексів, відчують антропогенний вплив, що підтверджується щорічним зростанням об'ємів скиду умовно та нормативно очищених стічних вод та збільшенням об'ємів забруднень гідросфери шахтними водами.

Шахтні води підвищеної мінералізації дренуються в нижчі водоносні горизонти і мігрують на великі відстані, засолюючи родючі ґрунти та поверхневі прісні води України, створюючи велике техногенне навантаження на навколишнє середовище. Отже, необхідно шукати різноманітні шляхи та засоби для очищення цих вод.

Унаслідок взаємодії в гірничих виробках із гірськими породами на шляху руху до водозбірників шахтні води досягають високої мінералізації, збагачуються продуктами руйнування гірських порід та вугілля. У результаті цього накопичуються сульфати, збільшується вміст лужноземельних елементів. Шахтні води стікаючи відпрацьованим простором збагачуються компонентами мінерального, механічного походження та завислими речовинами, що надають їм нові властивості та склад, що у свою чергу негативно впливає на якісні показники гідросфери.

Накопичення токсичних складових стічних вод створює суттєву техногенну небезпеку водноресурсному потенціалу держави. Повною мірою це стосується і стоків, забруднених речовинами, які відносяться до 2-го та 4-го класу небезпеки такі як органічні барвники, органічні розчинники та води насичені радіонуклідами, які є одними із найнебезпечніших для гідросфери.

Ступінь метаморфізації шахтних вод залежить від терміну перебування в кисневому або в безкисневому режимі. Перспективним методом знесолення шахтних вод є електродіаліз.

Таким чином із врахуванням класу безпеки забруднень водного середовища, та на основі моніторингових досліджень пропонується класифікація, в основі якої закладені шляхи використання природних та модифікованих природних сорбентів в залежності від виду та концентрації забруднень в стічних водах.

У четвертому розділі досліджено кінетику сорбції основних компонентів забруднень стічних вод та шахтних вод шляхом удосконалення адсорбційних процесів очищення із використанням природних сорбентів.

Кінетика процесу сорбції визначає зміну концентрації компонентів у розчині з часом та швидкість поглинання їх сорбентом. Можливими механізмами поглинання компонентів стічних вод сорбентом є іонний обмін, адсорбція та хімічна реакція.

Вибірковість адсорбції глинистих мінералів пояснюється не лише наявністю мікро-, мезо-, макропор, але й участю в адсорбційних процесах нанотрубок та існуванням пор між ними, що утворилися в процесі формування пакетів та вільними незкомпенсованими зарядами.

Досліджено, що радіус пор модифікованого бентоніту Ільницького родовища зміщується в сторону перехідних пор та макропор, що дозволяє стверджувати про розширення діапазону селективної сорбції. Збільшення кількості перехідних пор вказує, що основний внутрішній масообмін відбувається саме в цих порах. Крім цього, в таких порах може частково відбуватись і капілярна конденсація, яка спостерігається тоді, коли сфера дії полів не скомпенсованих поверхневих сил поширюється на весь об'єм пор.

Прогнозування процесу кінетики адсорбції на прикладі сорбції прямих барвників із стічних вод дозволяє встановити швидкість досягнення рівноваги, максимальну сорбційну ємність адсорбенту для певного складу розчину, механізм сорбційного процесу. Є можливість розрахувати коефіцієнти дифузії масообмінного процесу, а загалом – побудувати оптимізаційний профіль промислового процесу.

Проведені теоретичні розрахунки коефіцієнта заповнення пор в природних сорбентах прямими барвниками (рис.1) в залежності від числа обертів мішалки на основі розробленої математичної моделі із врахуванням ефективних коефіцієнтів внутрішньої дифузії. Гранулометричний склад сорбентів та їх розподіл по фракціях однаковий.

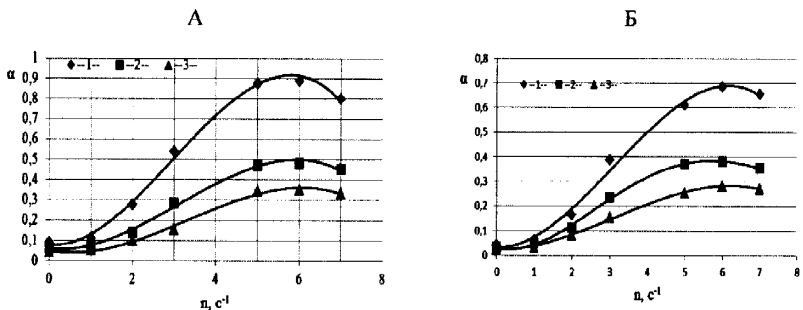


Рис. 1 - Вплив числа обертів мішалки на коефіцієнт заповнення пор адсорбенту (1- активований бентоніт; 2 – палигорськіт; 3 – глауконіт) прямими барвниками відповідно: А - аніонним червоним 8С; Б – активним алим 4ЖТ

Із представлених графічних залежностей видно, що максимальний коефіцієнт заповнення пор прямими барвниками для природних адсорбентів досягається за $n = 6c^{-1}$.

На основі побудованих залежностей, розрахованих ефективних коефіцієнтів внутрішньої дифузії та форми кінетичних кривих можна стверджувати, що процес із зовнішньодифузійного, або змішаного, переходить у внутрішньодифузійний, який характеризується числом Біо ($Bi \rightarrow \infty$).

Проте більш надійну інформацію про механізм дифузії дає метод переривання або так званої "кінетичної пам'яті".

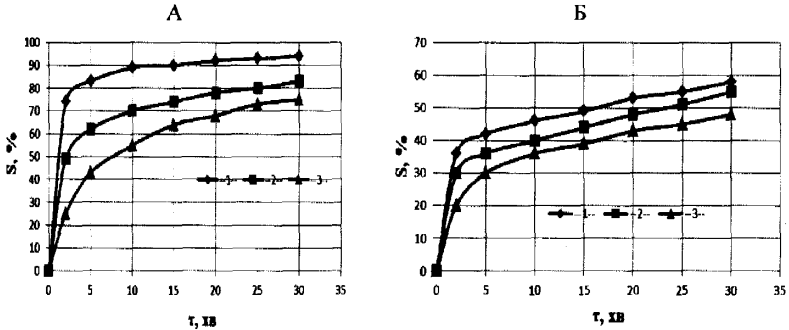


Рис. 2 - Кінетика сорбції прямих барвників (А - аніонного червоного 8С; Б - активного алого 4ЖТ) природними сорбентами: 1- активований бентоніт; 2 - палигорський; 3- глауконіт

На рис.2 представлені кінетичні криві адсорбції барвників в дослідях з перериванням перемішування через 5 хв. тривалістю в 10 хв. ($\Delta t=10$ хв). Градієнти концентрації в зерні адсорбенту вирівнюються протягом часу переривання контакту сорбенту та розчину, тобто коли процес дифузії сповільнюється. Тому після відновлення контакту швидкість обміну виявляється більшою у порівнянні з швидкістю, котра була до переривання. Таким чином зростання швидкості сорбції служить стверджуючим фактором внутрішньодифузійного процесу.

Для розрахунку ступеня досягнення адсорбційної рівноваги (F) використовували модель гелевої дифузії з обмеженого об'єму в елементарну частинку адсорбента кулястої форми:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi} \cdot e^{-\frac{\pi \cdot D_{eff} \cdot t}{R^2}} \quad (10),$$

де: D_{eff} - коефіцієнт внутрішньої дифузії, m^2/c ; t - час сорбції, хв.; R^2 - радіус зерна адсорбенту, м.

Необхідно відзначити, що степенева залежність частково характеризує критерій Фур'є.

Розрахунок коефіцієнта внутрішньої дифузії проводився на основі розробленої математичної моделі, приведеної в розділі 2.

Характер кінетичних кривих на рис.3 підтверджують домінуючий механізм внутрішньої дифузії в процесі адсорбції прямих барвників із стічних вод природними дисперсними сорбентами.

Для прогнозування зовнішньодифузійного процесу використовували теорію локальної ізотропічної турбулентності.

На рис. 4 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнтів масовіддачі β в залежності від числа обертів n . Отримані графічні залежності, які лежать в однаковій площині, дозволяють стверджувати про адекватність запропонованої методики розрахунку коефіцієнта масовіддачі з метою прогнозування інтенсивності процесу сорбції.

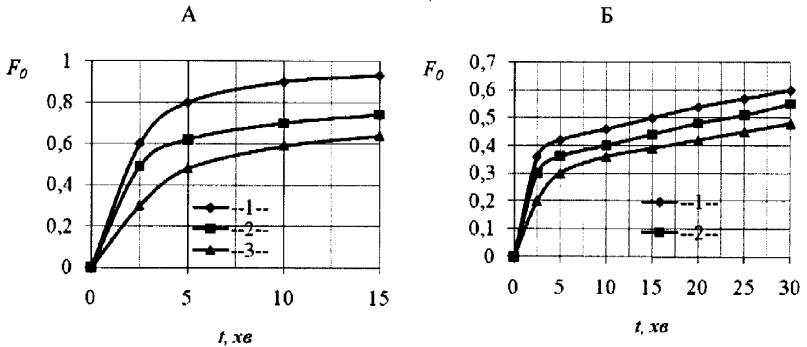


Рис. 3. - Кінетика зміни адсорбційної рівноваги (F) в процесі сорбції прямих барвників (А - аніонного червоного 8С; Б – активного алого 4ЖТ) природними сорбентами: 1 -активованій бентоніт; 2 - палигорський; 3 – глауконіт

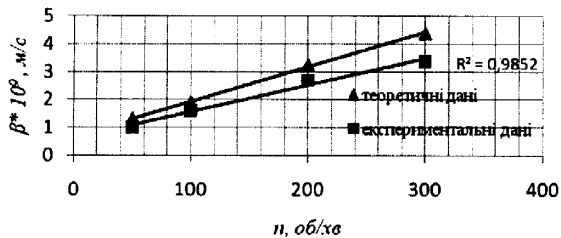


Рис. 4. - Залежність числа обертів від коефіцієнта масовіддачі для модельного розчину "забруднення -сорбент"

Таким чином, використовуючи поправочний коефіцієнт k_{β} , який враховує радіальну сепарацію твердої фракції сорбенту в обмеженому об'ємі рідини, значення експериментального коефіцієнту масовіддачі будуть наближатись до теоретичного коефіцієнту масовіддачі. Запропонована методика теоретичного визначення β може бути рекомендована для оцінки коефіцієнту масовіддачі в процесі адсорбції на дрібнодисперсній фракції сорбенту, що протікає в зовнішньодифузійній області.

Радіоактивні водні розчини складають більше 99 % всіх утворених рідких радіоактивних відходів (РРВ). В Україні поводження із високоактивними відходами обмежується охолодженням відпрацьованого ядерного палива і направленням його на зберігання у сухі сховища. Зважаючи на економічні аспекти, особливої уваги заслуговують адсорбенти на основі природної сировини, які здатні поглинати із рідкої фази та утримувати у своїй структурі радіоактивні елементи.

Адсорбційні процеси в системі «рідина-тверде тіло» характеризуються різною формою ізотерм рівноваги. Для більшості адсорбційних систем, в яких використовуються пористі тіла, характерна форма ізотерми Ленгмюра. На рис. 5 представлено ізотерму адсорбції стронцію із рідких радіоактивних відходів природними сорбентами, а також їх сумішами за температури 20⁰ С.

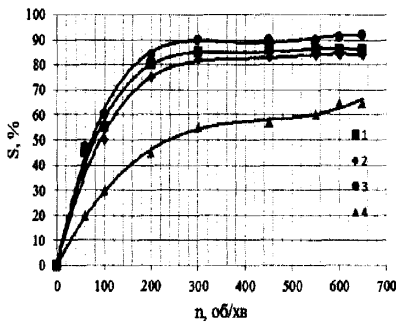


Рис. 5 - Ізотерма сорбції стронцію:
1 – модифікована бентонітова глина Язівського родовища сірки; 2 – монтморилоніт : палигорськіт (1:1) Дашуківського родовища; 3 – модифікована бентонітова глина Язівського родовища сірки і монтморилоніт Дашуківського родовища (1:1); 4 – палигорськіт Дашуківського родовища

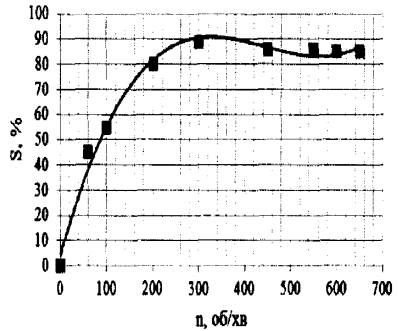


Рис. 6 - Залежність ступеня сорбції цезію композиційним сорбентом (модифікована бентонітова глина Язівського родовища сірки і монтморилоніт Дашуківського родовища (1:1)), від числа обертів. Співвідношення „рідина : тверда фаза” = $100 \text{ см}^3/\text{мг}$, вихідна концентрація цезію $1 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$, рН=7

Дослідження проводили за концентрації цезію в модельному розчині рівному $C = 1 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$. Порівняно висока сорбційна ємність суміші монтморилоніту та палигорськіту (1:1) Дашуківського родовища щодо Cs-134 (80 %) пояснюється розвинутою структурою пор.

Сорбційну здатність композиційного сорбенту визначали у динамічних умовах. Перемішування модельного розчину проводили в апараті із лопатевою мішалкою, частота обертів якої змінювалася в інтервалі 50–650 об/хв. Тривалість перемішування становила 40-50 хвилин. Проби відбиралися через певні проміжки часу і аналізувалися на вміст Cs у розчині. Суспензію розділяли центрифугуванням (400 об/хв, час розділення 15 хв), відбирали аліквоту розчину і аналізували на вміст цезію.

Отримані дані, які приведені на рис. 6, свідчать про те, що зовнішньодифузійний масообмінний процес найбільш ефективно проходить за 300 об/хв. Подальше збільшення швидкості обертів не впливає на інтенсивність процесу сорбції, що дає змогу стверджувати про те, що масообмінні процеси переходять у внутрішньодифузійну область, у цьому випадку зовнішні параметри не впливають на кінетику сорбції.

Результати експериментальних досліджень у вигляді узагальнених змінних $Sh = f(Re_m)$ представлені на рис. 7, дають можливість отримати лінійне рівняння для прогнозування інтенсивності процесу сорбції цезію з рідких радіоактивних відходів.

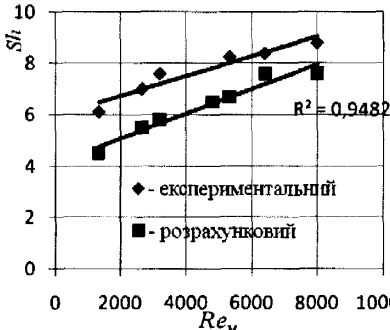


Рис. 7 - Залежність числа Шервуда від числа Рейнольдса

Встановлена залежність (11) критерію Шервуда від гідродинамічних режимів перемішування дозволяє прогнозувати інтенсивність сорбційних процесів в динамічних умовах і може бути використана для оцінки β .

Проводились дослідження оптимальних умов відділення відпрацьованих сорбентів від очищених стоків (на прикладі осадження відпрацьованих сорбентів при очищенні стоків від барвників). Для покращення процесу осадження використаного сорбенту рекомендовано використовувати 2% робочий розчин поліакриламід. Для приготування цього розчину 15%-ий розчин полімеру дозували в об'ємі 13,3см³ і доводили у мірній колбі до мітки 100см³ дистильованою водою. Пропонований спосіб має переваги в тому, що за меншого співвідношення сорбент : стічна вода 1:10 в системі, із використанням ПАА, в порівнянні з системою, без використання ПАА (1:20), використання 2% розчину поліакриламід дозволило досягти в 1,5 - 2 рази швидшого осадження сорбенту модифікованого бентоніту в стічній воді. На пропонований спосіб отримане позитивне рішення на видачу деклараційного патенту України.

У п'ятому розділі досліджено перспективи опріснення стічних та шахтних вод із використанням електродіалізу та встановлено, що використання у електродіалізі міжмембранних прокладок із електроізоляційних матеріалів дозволяє суттєвого збільшити падіння напруги та зменшити роботу поверхню мембран.

Дослідження електропровідності іонообмінної смоли КУ-2 як міжмембранної засипки в системах «іонообмінна смола – розчин NaCl» та «іонообмінна смола – розчин NH₄Cl» дозволили встановити значення концентрацій ізопрвідного розчину, значення опорів та констант комірок із іонообмінною смолою, насиченою

Отримані значення апроксимуються прямою лінією, що відповідає рівнянню

$$Sh = 5,7 + 2,42 \cdot 10^{-4} \cdot Re_m \quad (11)$$

У випадку зовнішньої дифузії основну роль відіграє транспорт речовин рухомими потоками до поверхні зерна адсорбенту. Головну роль у зовнішньодифузійному процесі відіграє гідродинаміка, а основною характеристикою є коефіцієнт масовіддачі β .

Доведено, що максимальна ступінь інтенсифікації відповідає внутрішньодифузійному режиму.

ізопровідним розчином, побудувати графіки залежності питомої електропровідності іоніту після центрифугування від концентрації досліджуваних розчинів. Отримані дані можуть бути використані для розрахунку процесу електродіалізу у досліджуваних системах із використанням міжмембранної засипки іонітом КУ – 2.

Для моделювання процесів електромасопереносу в електродіалізаторах, які містять міжмембранну засипку, необхідно мати інформацію щодо транспортно-структурних параметрів та механізму перенесення струму не тільки в іонообмінних мембранах, але також і в гранульованих іонітах. В даний час є численні літературні дані щодо електропровідності іонообмінних смол в розчинах різних електролітів різної природи, проте інформація про механізми перенесення струму в цих матеріалах відсутня.

Нами проводились дослідження впливу природи протіону на перенесення струму через структурні фрагменти сульфокатіонітової смоли КУ-2 шляхом аналізу параметрів розширеної трьохпровідної моделі, визначених із концентраційної залежності питомої електропровідності смоли в розчинах різних електролітів.

Концентраційні залежності електропровідності смоли в розчинах електролітів різної природи були використані для знаходження параметрів розширеної трьохпровідної моделі, згідно із якою струм в іоніті може розповсюджуватись трьома паралельних каналами:

- послідовно через гель і розчин (параметр a);
- тільки через гель (параметр b);
- тільки через розчин (параметр c).

Частки струму, що протікають через гель та розчин в змішаному каналі рівні відповідно d і e (рис. 10).

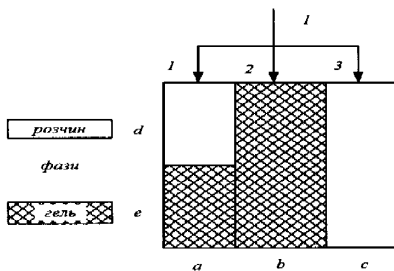


Рис. 10 - Схематичне зображення трьохпровідної моделі провідності іонообмінника.

Основні рівняння трьохпровідної моделі:

$$K_{cm} = \frac{aK_d}{e + dK_d} + bK_d + c, \quad (12),$$

$$a + b + c = 1, \quad (13),$$

$$e + d = 1 \quad (14)$$

пов'язують між собою параметри, що характеризують частки струму, що проходить через зазначені канали (a, b, c, d, e) та параметри K_{cm} і K_d , що є

електропровідністю смоли (K_{cm}) і її гелевої фази (K_{iso}), нормовані на електропровідність розчину (K):

$$K_{cm} = \frac{K_{cm}}{K} \quad \text{і} \quad K_d = \frac{K_{iso}}{K}. \quad (15).$$

Для іонообмінної смоли і мембрани розрахувати параметри трьохпровідної моделі можна тільки у тому випадку, якщо зв'язати їх з параметрами двохфазної моделі провідності цих матеріалів, яка враховує їх мікрогетерогенну неоднорідність:

$$f = ae + b \quad (16), \quad b = f^{1/\alpha} \quad (17),$$

$$c = (1 - f)^{1/\alpha} \quad (18), \quad e = (f - b)/a \quad (20),$$

$$a = 1 - (1 - f)^{1/\alpha} - f^{1/\alpha} \quad (19), \quad d = 1 - (f - b)/a \quad (21).$$

Параметр α змінюється від -1 до +1: $\alpha = 1$ відповідає паралельному розташуванню фаз щодо транспортної осі, $\alpha = -1$ - послідовному, $\alpha \rightarrow 0$ - хаотичному.

Перехід іоніту в протонну форму супроводжується зменшенням об'ємної частки гелевої фази та збільшенням об'ємної частки рівноважного розчину. У цьому випадку відбувається подальша впорядкованість структури смоли (зростання параметру) в результаті формування в набряклому полімері додаткових ділянок із паралельним з'єднанням фаз гелю та розчину.

Виконаний аналіз параметрів розширеної трьохпровідної моделі провідності іонообмінної смоли КУ-2 в різній іонній формі показав, що, незалежно від природи протиіону, основна частка струму в іоніті переноситься через канал із послідовним розташуванням провідних фаз гелю та розчину. Виявлені відмінності в модельних параметрах для смоли в сольовій та протонній формі, пов'язані із особливим механізмом перенесення протону, підтверджують адекватність застосованого підходу для оцінки впливу природи протиіону на перенесення струму через структурні фрагменти сульфокатіонітової смоли. Проміжне положення параметрів для смоли в NH_4^+ -формі пов'язане із частковим переходом смоли в H^+ -форму через гідроліз NH_4Cl .

Для практичного використання отриманих результатів нами пропонується комбінована технологічна схема очищення стічних та високомінералізованих шахтних вод із використанням селективних сорбційних здатностей природних сорбентів для поглинання основних забруднень та з подальшим знесоленням методом електродіалізу із міжмембранною засипкою КУ-2.

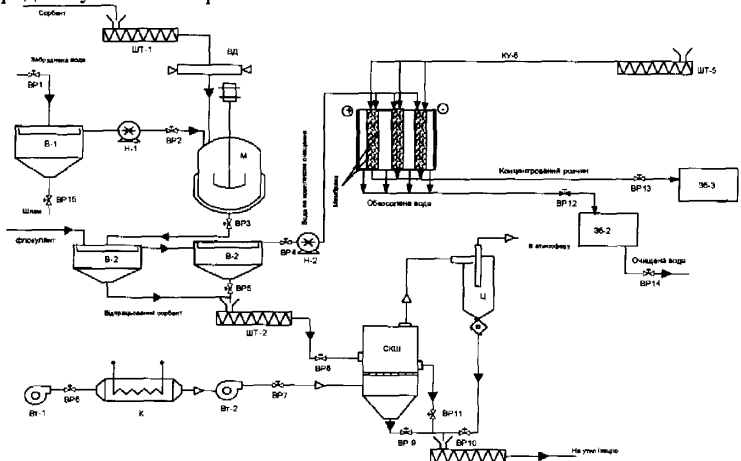


Рис. 11 - Принципова технологічна схема очищення стічних та шахтних вод природними модифікованими сорбентами із використанням електродіалізу та міжмембранним наповненням КУ-2

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи розв'язано актуальне науково-практичне завдання підвищення рівня екологічної безпеки гідросфери шляхом удосконалення процесів очищення стічних та шахтних вод від забруднень адсорбцією їх природними сорбентами та процесів обезсолювання із застосуванням електродіалізу.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Аналіз екологічної небезпеки від забруднення гідросфери стічними та шахтними водами показав, що практично всі поверхневі та значна частина підземних водних ресурсів, особливо в районах розташування потужних промислових комплексів, відчувають антропогенний вплив, що підтверджується щорічним зростанням об'ємів скиду умовно та нормативно очищених стічних вод та збільшенням об'ємів забруднень гідросфери шахтними водами.

2. Дослідженнями характеристик розподілу діаметру пор природних та модифікованих сорбентів встановлено, що в основному радіус мікропор природних сорбентів знаходиться в діапазоні 1,8...2,5 нм – мікропор та перехідних пор - 2,5...5,0 нм., що підтверджує обґрунтування селективності адсорбції забруднень із стічних вод. Доведено, що внутрішньодифузійні масообмінні процеси проходять в області розмірів пор природних та модифікованих сорбентів, характерних для перехідних.

3. Дослідження методів прогнозування сорбційних процесів із використанням природних сорбентів дозволили встановити залежність коефіцієнтів масовиддачі β від числа обертів n , що дозволяє оцінити значення коефіцієнта масовиддачі в процесі адсорбції на дрібнодисперсній фракції сорбенту, що протікає в зовнішньодифузійній області.

4. Встановлено зростання ступеня сорбції іонів стронцію (до 90%) композиційним сорбентом на основі модифікованих оксидом титану бентонітових порід Язівського родовища та монтморилоніту Дашуківського родовища у співвідношенні 1:1. Доведено, що максимальна ступінь інтенсифікації відповідає внутрішньодифузійному режиму, тому залежність критерію Шервуда від гідродинамічних режимів перемішування дозволяє прогнозувати інтенсивність сорбційних процесів в динамічних умовах і може бути використана для оцінки β .

5. Встановлено, що використання ПАА для інтенсифікації відділення відпрацьованого сорбенту від очищених стоків за меншого співвідношення сорбент : стічна вода (1:10) в порівнянні із системою, без використання ПАА (1:20), дозволяє досягти в 1,5 - 2 рази швидшого осадження сорбенту.

6. Досліджена електропровідність іонообмінної смоли КУ-2 як міжмембранної засипки електродіалізерів в системах «іонообмінна смола – розчин NaCl» та «іонообмінна смола – розчин NH₄Cl» та встановлені значення концентрацій ізопровідного розчину, значення опорів та констант комірок із іонообмінною смолою, насиченою ізопровідним розчином, побудовані графіки залежності питомої електропровідності іоніту після центрифугування від концентрації досліджуваних розчинів.

7. Аналіз параметрів розширеної трьохпровідної моделі провідності іонообмінної смоли КУ-2 в різній іонній формі показав, що, незалежно від природи

протиіона, основна частка струму в іоніті переноситься через канал із послідовним розташуванням провідних фаз гелю та розчину.

8. Розроблена ефективна технологічна схема демінералізації стічних та шахтних вод із застосуванням електродіалізу із міжмембранною засипкою іонітом. Результати дисертації передані для впровадження у ТзОВ «Проектний центр гірничо-хімічної промисловості». Очікуваний економічний ефект від впровадження установки очищення шахтних вод шахти «Великомостівська» продуктивністю 720 м³/добу, розрахований відділом кошторисів ТзОВ «Проектний центр гірничо-хімічної промисловості», складе 1 млн 370 тис.грн в рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Колективна монографія

1. Мальований М.С. Очищення стічних вод від іонів амонію шляхом адсорбції на природних дисперсних сорбентах / М. С. Мальований, К.І. Петрушка, Г.В. Сакалова, О.В. Стокалюк // Розвиток і відтворення ресурсного потенціалу суб'єктів еколого-економічних, туристичних та екоінформаційних систем. – Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2015. – С.225-238.

Статті у наукових фахових виданнях, які входять до науко метричної бази даних Scopus, Index Copernicus)

2. Петрушка І.М. Механізм сорбції Cs-137 та Cs-134з рідких радіоактивних відходів модифікованими Язівськими глинами / І.М. Петрушка, М.С. Мальований, К.І. Петрушка // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №4/6 (58). – С.28-31. (*Index Copernicus*)

3. Мальований М.С. Використання гелевої моделі для дослідження кінетики адсорбції прямих барвників з стічних вод природними сорбентами / М.С. Мальований, І.М. Петрушка, К.І. Петрушка // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Випуск 2(79). – 2013. – С.129-132. (*Index Copernicus*)

4. Петрушка І.М. Інтенсифікація сорбції цезію комплексними природними сорбентами з рідких радіоактивних середовищ / І.М. Петрушка, Ю.Й. Ятчишин, К.І. Петрушка // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №5/10 (71) – С. 47-51. (*Index Copernicus*)

5. Петрушка І.М. Математичне моделювання ресурсозберігаючих технологій очищення стічних вод / І.М. Петрушка, О.І. Мороз, К.І. Петрушка // Актуальні проблеми економіки 2016.– №4 (178). – С. 433–439. (*Scopus*)

6. Petrushka K. Methods of salt content stabilization in circulating water supply systems /V. Shmandiy, L. Bezdeneznych , O. Kharlamova , A. Svjatenko , M. Malovanuy , K. Petrushka , I. Polyuzhyn. // Chemistry & chemical technology 2017.- Vol. 11, No. 2, pp. 242–246. (*Scopus*).

Статті у наукових фахових виданнях

7. Петрушка І.М. Перспективність використання природних сорбентів для забезпечення екологічної безпеки водноресурсного потенціалу держави / М.С. Мальований, І.М. Петрушка, Ю.О. Малик, К.І. Петрушка // Науковий вісник НЛТУ України. Збірник науково-технічних праць. – 2013. – № 23.4. – С. 68-75.

8. Петрушка І.М. Характеристика розподілу діаметру пор природних та модифікованих сорбентів / І.М. Петрушка, О.Д. Тарасович, К.І. Петрушка // Науковий вісник НЛТУ України. Збірник науково-технічних праць. – 2013. – № 23.7. – С. 102-106.

9. Петрушка І.М. Методи прогнозування сорбційних процесів з використанням природних сорбентів / І.М. Петрушка, М.С. Мальований, Ю.Й. Ятчишин, К.І.

Петрушка // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Міністерство освіти і науки України. – Одеса. – 2015. – № 47.-Том 1. – С. 48-52.

10. Петрушка І.М. Очищення цукровмісних розчинів від барвних речовин природними сорбентами / І. М. Петрушка, К.І. Петрушка // Цукор України. – №3(111). – 2015. – С. 13-17.

11. Петрушка І.М. Перспективи очищення водного середовища для забезпечення безпеки водноресурсного потенціалу в системі ресурсозберігаючих технологій/ І.М. Петрушка, І.З. Крет, К.І. Петрушка //Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Логістика», 2015. – С. 72-81.

Патенти

12. Заявка на видачу патенту на винахід (КМ) України u201700842 від 30.01 2017р. Спосіб очищення стічних вод від прямих барвників / Мальований М.С., Петрушка К.І., Голодовська О.Я., Петрушка І.М.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка».

13. Заявка на видачу патенту на винахід (КМ) України u201700911 від 01.03 2017р. Спосіб очищення сульфідних стоків / Мальований М.С., Ріпак Н.С., Голодовська О.Я.; Петрушка К.І., заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка»..

Тези доповідей

14. Забезпечення безпеки рідинного середовища природними дисперсними сорбентами / І.М. Петрушка, К.І. Петрушка // Стан природних ресурсів, перспективи їх збереження та відновлення: II Міжнародна науково-практична конференція, 11 – 13 жовтня 2012 р.: тези доповідей. – 2012. – С. 128.

15. Мінімізація впливу рідких радіоактивних відходів на навколишнє середовище/ Петрушка І. М., Петрушка К.І., Ятчишин Ю. Й.// Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки». Кремен-чуг, Україна. 8- 9 жовтня 2014 р. - С. 16-17.

16. Перспективи застосування комплексних сорбентів на основі глобулярної форми вуглецю для очищення стічних вод / І.М. Петрушка, О.Д. Тарасович, К.І. Петрушка // Збірник матеріалів 3-го міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища, енергоощадність. Збалансоване природокористування». Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 17- 19 вересня 2014р. – 2014. – С. 88.

17. Комплексні сорбенти в природоохоронних технологіях / І.М. Петрушка, К.І. Петрушка //Збірник матеріалів 3-го міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища, енергоощадність. Збалансоване природокористування». Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 17- 19 вересня 2014р. – 2014. – С. 95.

18. Основи моделювання механізму сорбції забрудників з рідинних середовищ природними сорбентами / І.М. Петрушка, М.С. Мальований, К.І. Петрушка // Збірник наукових праць Вінницького політехнічного інституту. – “Екологія”, Україна. – 2015. – 80 с.

19. Математичне моделювання ресурсозберігаючих технологій очищення стічних вод / І. М. Петрушка, М.С. Мальований, К.І. Петрушка // Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті : XIV Міжнародний науковий семінар / за наук. ред. д.е.н., проф. М. М. Єрмошенка; Національна академія управління; Міжнародна академія інформатики. Київ – оз. Світязь. – К. : СІК ГРУП УКРАЇНА, 29 червня – 3 липня 2015 р. : тези доповідей. – 2015. – С. 210-213.

20. Рациональне використання природно-ресурсного потенціалу для забезпечення екологічної безпеки водного середовища / І.М. Петрушка, О.І. Мороз,



Міжнародної науково-практичної конференції «Регіон-2015: стратегія офіційного розвитку». – Харків. – 2015. – С. 286-288.

21. Перспективи використання електродіалізу для очищення шахтних вод / М. Мальований, К.І. Петрушка // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції / Національний університет цивільного захисту України. – Х.: НУЦЗУ – 2015. – С. 129.

22. Determination of Electrical Conductivity of Ion Exchange Resins / M. Malovanyu, K. Petrushka // V Міжнародний молодіжний наукового форуму “Litteris et Artibus”, 26–28 листопада, 2015 р. : тези доповідей. – Україна, Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 2015. – С. 454.

23. Очищення стічних вод методом електродіалізу / К.І. Петрушка, М.С. Мальований, І.М. Петрушка // Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг: Матеріали I Міжнародна науково-технічна конференція : тези доповідей. - Львів: ЗУКЦ – 2015. – С. 109-111.

24. Перспективи застосування електродіалізу для обезсолювання стічних вод / К.І. Петрушка, М.С. Мальований, Н.А. Кононенко, І.М. Петрушка // Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: II Міжнародна науково-практична конференція: тези доповідей. – Львів: ЛДУ БЖД – 2015. – С. 228-229.

25. Перспективи використання електродіалізу для очищення шахтних вод/ Мальований М.С., Петрушка К.І. // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції / Національний університет цивільного захисту України. -Х.: НУЦЗУ, 2015. С.129.

26. Способи прогнозування сорбційних процесів в природоохоронних технологіях / І.М.Петрушка, К.І. Петрушка // Збірник матеріалів 4-го міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 21- 23 вересня 2016р. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів – 2016. – С. 134.

27. Електродіаліз із використанням міжмембранної засипки іонообмінних смол / М.С. Мальований, К.І. Петрушка // Збірник матеріалів 4-го міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 21- 23 вересня 2016р. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів. – 2016.– С. 168.

28. Investigation of resin KU-2 conductivity for application in electrodialysis of wastewater / Myroslav Malovanyu, Kate Petrushka, Natalia Kononenko, Olga Demina // Ion transport in organic and inorganic membranes: International conference, 23 - 28 May, Krasnodar. – 2016. – P. 186.

29. Danger Pollution of the Hydrosphere Ammonium Salts / M. Malovanyu, K. Petrushka //Матеріали VI Міжнародного молодіжного наукового форуму “Litteris et Artibus”, 24–26 листопада, 2016 р. – Україна, Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 2016. – С. 466.

30. Методи прогнозування ефективності очищення стічних та шахтних вод природними сорбентами / К. І. Петрушка, М.С. Мальований, І. М. Петрушка // Актуальні задачі сучасних технологій: V Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, 17-18 листопада 2016р.: тези доповідей. – Тернопіль, Україна: М-во освіти і науки України, ТНТУ ім. І. Пулюя. – 2016. – С. 22.

31. Шляхи оптимізації методів прогнозування сорбційних процесів з використанням природних сорбентів/Петрушка І.М., Мороз О.І., Петрушка К.І., Мокрий В.І.// Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Екогео-

ABSTRACT

Petrushka K.I. . Improvement of adsorption - ion exchange processes of sewage and mine water treatment. - The manuscript.

Thesis for a candidate's of engineering sciences by specialty 21.06.01 – ecological safety. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

The thesis is dedicated to providing environmental safety of water bodies through disposal of wastewater and mine water adsorption - ion-exchange methods. A complex method as sewage and mine water, based on the use of natural Dashukivski modified bentonite deposit. The dissertation's researches are based on dairy wastewater systems, existing modern methods of treatment and basic methods of sorption as the most economically and environmentally beneficial method of wastewater treatment.

The thesis investigates waste and mine water Chervonograd mining region, existing methods of modern cleaning and proposed a combined method of cleaning based on the method of sorption as the most economically and environmentally beneficial method of wastewater treatment and electro dialysis with intermembrane filling for demineralization highly concentrated solutions.

Methods of physical and chemical analysis of the structure of natural and modified bentonite before and after adsorption, frame structure, and pore size distribution. First theoretically and experimentally proved that the dependence of the coefficient β mass transfer the number of revolutions n to evaluate mass transfer coefficient in the process of adsorption on the sorbent fine fraction occurring in foreign-diffusion region.

The increase in degree of sorption of strontium (90%) composite sorbent based on modified titanium oxide bentonite rock Yazivskoho field and montmorillonite Dashukivski deposit ratio of 1: 1 and proved that the maximum degree of intensification of an internally-diffusion mode, allowing use dependency criterion Sherwood mixing of hydrodynamic regimes for predicting the intensity of sorption processes in dynamic conditions and to assess the value of β .

For the first time the analysis parameters extended three-wire models conductance ion exchange resin KU-2 in different ionic form, allowing to predict the demineralization process wastewater and mine water by electro dialysis intermembrane filling with resin.

A combined technological scheme of process wastewater and mine water mining complex.

Keywords: natural sorbent mass transfer, kinetics, isotherms, ion exchange process and mine water effluent, liquid radioactive waste, mathematical models.