

ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ НА КІНЕТИКУ АДСОРБЦІЇ АЛЬБУМІНУ

Сабадаш В.В., д-р. техн. наук., проф., Гумницький Я.М., д-р. техн. наук., проф.
Національний університет “Львівська політехніка”, Львів

Анотація. У роботі приведено проблеми очищення стічних вод молокопереробних підприємств та м'ясокомбінатів, забруднених органічними речовинами.

Розглянуто теоретичні засади адсорбційних процесів у апараті з мішалкою для структурованих і неструктурованих рідин. Приведено математичний апарат для опису кривих течії структурованих рідин та суспензій. Встановлено вплив гідродинаміки на масообмінний процес у двофазній системі. Досліджено вплив фізичних властивостей фаз на процес адсорбції. Для опису гідродинамічних умов процесу застосовано теорію локальної ізотропної турбулентності. Розраховано затрати енергії на перемішування, питому енергію дисипації та значення критеріїв Рейнольдса та Ейлера для кожного розглянутого випадку. Приведено результати експериментальних досліджень процесу зовнішньої дифузійної адсорбції для суспензій цеоліт-розчин альбуміну для різних частот перемішування: 200, 300 та 500 об/хв. Розраховано коефіцієнти масовіддачі та значення ефективного коефіцієнта дифузії для досліджуваної адсорбційної системи. Одержано критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі. Коефіцієнти внутрішньої дифузії альбуміну у цеоліті за різних чисел обертів становили від: становили $7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ до $2,62 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ для 500 об/хв. Встановлено, що зі збільшенням числа обертів відбувалося збільшення коефіцієнта масовіддачі та ефективного коефіцієнта дифузії. Згідно представлених результатів випливає, що турбулізація потоку дозволяє рівномірно розподілити частинки сорбенту в реакторі та знизити дифузійний опір. Представлено кінетичні криві адсорбції природним цеолітом для зовнішньодифузійного та внутрішньодифузійного процесу. Проведено статистичну оцінку одержаних результатів. Для отриманих результатів критерій Пірсона χ^2 становив 0.94, критерій Стюдента $t = 0.002$ середньоквадратичне відхилення $SSD = 0.2$.

Ключові слова: стічні води, адсорбція, цеоліт, альбумін, кінетика, масообмін.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Для інтенсифікації процесів адсорбції та ряду технологічних процесів застосовують реактори з мішалкою. Такі апарати застосовують для культивування поживних середовищ, ферментації, проведення хімічних реакцій, кристалізації, розчинення, реалізації адсорбційних, екстракційних та інших процесів. Проте для оптимізації енергетичних затрат на реалізацію цих процесів часто стикаються з проблемою зміни реологічних властивостей рідин та суспензій, що приймають участь у цих процесах.

Аналіз останніх досліджень. Під час очищення стічних вод в реальних умовах у багатьох випадках мають справу з неньютонівськими рідинами. Це пов'язано з неоднорідністю дисперсного складу стоків, наявністю в них колоїдних частинок та високомолекулярних сполук [1]. Проблема опису гідродинаміки таких систем є актуальною з точки зору забезпечення оптимального вилучення небезпечних речовин зі стоків, в'язкість яких нелінійно змінюється стосовно прикладеного навантаження (перемішування). Тому на початковій стадії процесу необхідна додаткова енергія активації для руйнування структури рідини. Також наявність у стоках високомолекулярних сполук може призводити до стабілізації суспензій та перешкоджає процесу адсорбції. Утворені агрегати мають лінійні розміри, що перевищують діаметр пор сорбента [2, 3]. Важливе значення в процесі адсорбції має також інтенсивність перемішування адсорбенту з адсорбатом. У попередніх публікаціях було представлено результати експериментальних досліджень адсорбції альбуміну в статичних та динамічних умовах. У працях [4, 5] було представлено результати експериментальних досліджень адсорбції альбуміну в умовах механічного перемішування для 300-800 об/хв. Дослідження кінетики адсорбції високомолекулярних сполук показує можливість інтенсифікації процесу при інтенсивному перемішуванні. Дані дослідження кінетики адсорбції природним цеолітом Сокиринського родовища відповідали теоретичним моделям. Було встановлено, що на адсорбцію впливає концентрація адсорбату. Кінетичні параметри показали, що швидкість адсорбції значно збільшується зі швидкістю перемішування. Надана модель найкраще відповідає експериментальним даним і передбачає зміну пористості частинок на ефективність видалення [7]. Даний адсорбент не дорогий, широкодоступний і вирішує екологічну проблему.

Авторами [8, 9] досліджувалася кінетика адсорбції барвника з водних розчинів. Правильний вибір швидкості змішування дає можливість збільшити кількість адсорбованого барвника на поверхні активованого вугілля. Автори роботи [11] досліджували вплив швидкості перемішування на адсорбцію метилового оранжевого на вуглецевих нанотрубках. При значному збільшенні швидкості перемішування з 300 об/хв до 700 об/хв адсорбція барвника зросла майже вдвічі з 25 мг/г до 45 мг/г. Збільшення адсорбції барвника при такій високій швидкості змішування автори пояснили певним підвищенням доступності забарвленої органічної сполуки до внутрішньої поверхні адсорбенту.

Формулювання цілей статті. Мета роботи – дослідження закономірностей адсорбції високомолекулярних сполук у зовнішньо- та внутрішньодифузійних областях.

Експериментальні дослідження кінетики зовнішньодифузійної стадії сорбції альбуміну. Під впливом фізичних, хімічних та біологічних факторів білки зазнають глибоких змін, пов'язаних із порушенням четвертинної, третинної та вторинної структур, що призводить до зміни фізико-хімічних та біологічних властивостей білка [1]. Білки зазнають змін, небажаних або передбачуваних, під час зберігання, оброблення, в результаті хімічних та біохімічних реакцій. Цілеспрямовано, ферментативно та хімічно змінюючи структуру білків, можна впливати на їхні функціональні властивості. Під час денатурації білків відбувається розрив міжмолекулярних зв'язків, зміна конфігурації молекули білка, зниження його молекулярної маси і зниження його гідрофільних властивостей. Механічні процеси перемішування також супроводжуються зниженням в'язкості досліджуваного розчину. Отже, збільшення швидкості обертання ротора мішалки інтенсифікує процес адсорбції [7].

Адсорбція високомолекулярних сполук переважно відбувається на поверхні розділу фаз, оскільки їх розмір більший за діаметр пор сорбенту. Тому процес здійснюється у зовнішньодифузійній області. Кінетику адсорбції альбуміну із водних розчинів природним цеолітом досліджували відповідно до методики, наведеної у [4], за початкової концентрації альбуміну $19,8 \text{ г/дм}^3$. Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 1.

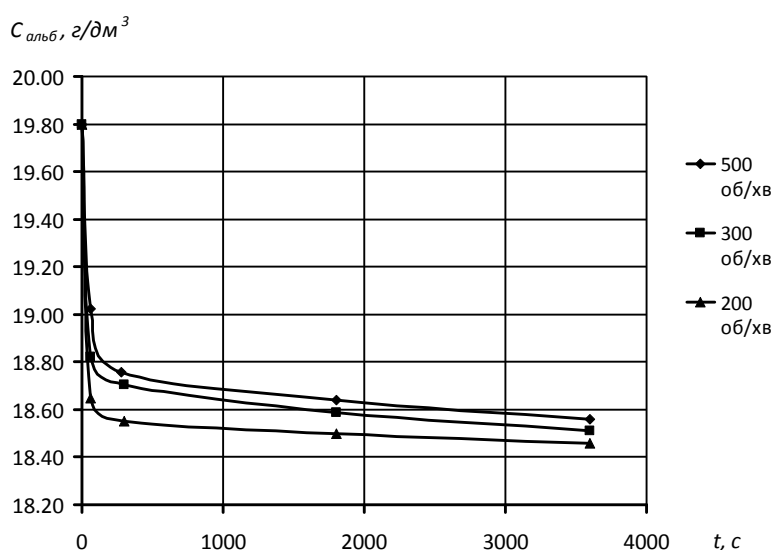


Рис. 1 – Кінетика сорбції альбуміну природним цеолітом

У перші 5 хвилин адсорбції в умовах механічного перемішування (рис. 1) зміна концентрації альбуміну під час адсорбції є лінійною і процес відбувається в зоні зовнішньої дифузії, а це означає, що не спостерігається внутрішньодифузійного транспортування речовин, що спостерігається через 100 с від початку процесу. Розрахунок параметрів процесу адсорбції альбуміну здійснено згідно із [3].

В умовах експерименту критерій Пірсона χ^2 становив 0.94, критерій Стюдента $t = 0.002$ середньоквадратичне відхилення $SSD = 0.2$.

Метою дослідження було визначення рушійної сили адсорбції. Оскільки упродовж процесу адсорбції відбувається зниження концентрації білка у рідині, а на зовнішній поверхні адсорбенту концентрація білка зростає, рушійна сила є змінною величиною і з часом зменшується. Середня концентрація альбуміну $\bar{C}$ у період часу від τ_0 до τ_1 можна описати наступним виразом [4]:

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{\tau_1} C \cdot d\tau}{\tau_1}. \quad (1)$$

Якщо прийняти зміну концентрації у рідині на початковій ділянці часу прямолінійною, то середня концентрація дорівнюватиме

$$\bar{C} = C_0 - \frac{b}{2} \tau. \quad (2)$$

Згідно з рис. 1 прямолінійна ділянка кінетичних кривих становить приблизно 30с. Масу поглинутого альбуміну ΔM для перших 30 с дослідження розраховували згідно із рівнянням матеріального балансу [6]

$$\Delta M = V(c_n - c_{30}), \quad (3)$$

де V – об'єм адсорбата, в умовах експерименту $V = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; C_n – концентрація альбуміну в момент часу τ_0 , кг/м^3 ; C_{30} – концентрація адсорбату в реакторі за проміжок часу 30 с, кг/м^3 .

На початковій стадії адсорбції значення коефіцієнтів масовіддачі β було у межах $0,42 \dots 2,51) \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

Для експериментальних досліджень використовували фракцію цеоліту з еквівалентним діаметром зерен $\bar{d} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, проте для спрощення обчислень поверхні масообміну приймали форму частинок сорбента кулястою. Площа зовнішньої поверхні частинок, що беруть участь у масообміні, дорівнюватиме:

$$F = \frac{6M}{\rho_{ad}\bar{d}} = 0,0416 \text{ м}^2. \quad (4)$$

Отже, вирівнюючи концентрацію на поверхні розділу фаз, можна інтенсифікувати процеси у яких лімітуючою стадією є дифузія адсорбтиву до поверхні сорбенту. Процес зовнішньої дифузії відбувається на початковій стадії адсорбції низькомолекулярних сполук, коли концентрація адсорбату на поверхні адсорбенту прямує до нуля, при адсорбції ВМС та при адсорбції сильно розбавлених розчинів.

Гідродинаміка потоку також визначає тип дифузійного процесу. Число Рейнольдса розраховували за формулою, приведеною у [4, 5, 6]:

Значення коефіцієнта β обчислювали теоретичним методом, що ґрунтується на теорії локально-ізотропної турбулентності. Метод успішно використовують у процесах розчинення твердих тіл [6].

Між зовнішньодифузійною стадією адсорбції та розчиненням існує певна аналогія, оскільки обидва процеси належать до масообмінних процесів у гетерогенних системах. В умовах експерименту розглядали область турбулентного потоку, яка менша основної зони турбулентності, але більша області, у якій відбувається дисипація енергії. Таким чином, приймали, що всі властивості системи, які обумовлені її статичними властивостями є однакові у всіх напрямках. Параметри лабораторної установки і турбулентний режим проведення процесу адсорбції дає змогу прийняти ізотропний стан системи, для якого гідродинамічні параметри можна вважати однаковими [7].

Предметом моделювання турбулентності є нескінченна кількість зв'язків між окремими масштабами явища, наслідком яких є процеси турбулентного транспортування маси, імпульсу або скалярних величин (енергії, теплоти). Ці взаємодії зазвичай прирівнюють до вихрової структури турбулентності, яку подають як нескінченний каскад вихорів, що здійснюють транспортні процеси, характерні для турбулентного потоку. Тому інтенсивність перенесення маси, імпульсу та енергії на кілька порядків вища, ніж у ламінарному потоці. В умовах механічного перемішування коефіцієнт масовіддачі β_p [8, 9]:

$$\beta_p = 0,267^4 \sqrt{\frac{\varepsilon_0 V}{Sc^3}} \quad (5)$$

де

v – кінематична в'язкість розчину альбуміну, $\text{м}^2/\text{с}$;

Sc – число Шмідта;

ε_0 – питома енергія розсіювання, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

$$\varepsilon_0 = \frac{N}{\rho \cdot V}, \quad (6)$$

Енергія, що передається від мішалки до рідини за рахунок тертя рідини до стінки апарата та дисипації енергії у рідині. Питома енергія дисипації пропорційна затратам енергії на перемішування та обернено пропорційна масі реакційної суміші [10].

Потужність на перемішування механічною мішалкою визначимо згідно із [9]:

$$N = Eu d_M^5 n^3 \rho, \quad (7)$$

де Eu – Критерій Ейлера;

d_M – діаметр лопатей мішалки, м ;

n – швидкість обертання перемішувального пристрою, $1/\text{с}$.

де V – об'єм адсорбату (дисперсійного середовища), м^3 ;

N – витрата енергії на перемішування в одиницю часу, Вт

Експериментальні дослідження кінетики адсорбції проводили в діапазоні 200 – 500 об/хв, тому розглядали моделі зовнішньої та внутрішньої дифузії. Для зовнішньодифузійної стадії було визначено відповідність значень критерію Шервуда до критерію Рейнольдса. Зовнішньодифузійну стадію розглядали для першого періоду адсорбції, коли відбувається заповнення зовнішньої поверхні адсорбенту. Між концентрацією компонента на поверхні (адсорбату) та його концентрацією у мономолекулярному поверхневому шарі ріди-

ни (адсорбтиву) C встановлюється рівновага. Наприклад, для адсорбції альбуміну природним цеолітом рівновага має вигляд виразу Ленгмюра [11, 12]

$$a^* = 14.1 \cdot \frac{0.2 \cdot C}{1 + 0.2 \cdot C}, \quad (8)$$

де a^* – адсорбційна здатність цеоліту, г/г адс.

На рис. 2 наведено розрахункові дані згідно із залежностями (9.15) і (9.16), за якими число Шервуда зростає залежно від числа Рейнольдса.

Цю залежність подаємо таким виразом:

$$Sh = 2 \cdot 10^{-5} Re + 8.97. \quad (9)$$

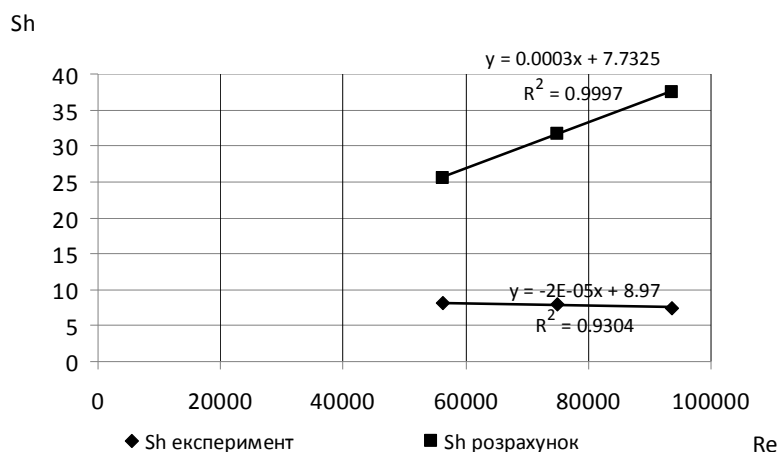


Рис. 2 – Вплив гідродинамічних умов на процес адсорбції альбуміну в умовах механічного перемішування

З рис. 2. випливає, що реалізація процесу адсорбції альбуміну в умовах перемішування призводить до зниження коефіцієнта масовіддачі. Це обумовлюється рядом причин, зокрема й тим, що в умовах перемішування змінюється в'язкість неньютонівських рідин. Також відомо, що процеси перемішування супроводжуються незначним нагріванням рідини, що негативно впливає на адсорбцію та знижує в'язкість. В умовах експерименту ця різниця становила до 2°C .

Також енергія зв'язку білка з поверхнею сорбента слабка, а турбулізація потоку сприяє їх десорбції [4].

Внутрішньодифузійна кінетика сорбції білка (альбуміну) природним цеолітом

Закономірності внутрішньодифузійної кінетики сорбції білка (альбуміну) природним цеолітом наведено на рис. 3. Встановлення рівноважної концентрації в апараті за тривалості сорбції $\tau > 200$ с вказує на внутрішньодифузійну область процесу [2].

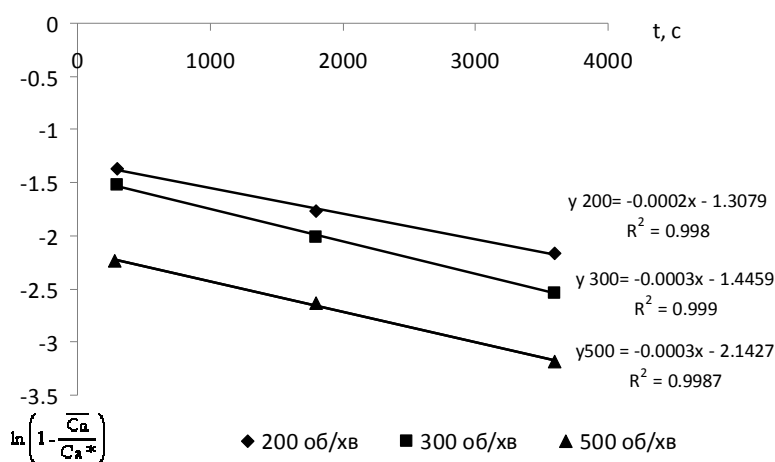


Рис. 3 – Кінетика сорбції білка цеолітом в апараті з мішалкою

Коефіцієнт внутрішньої дифузії молекул альбуміну в зернах цеоліту розраховано за значеннями танген-са кута нахилу кривих α (рис. 3). Дослідження здійснено в апараті із пропелерною мішалкою за 200, 300 та 500 обертів за хвилину. Одержано такі значення коефіцієнтів внутрішньої дифузії альбуміну на цеоліті за відповідних кількостей обертів мішалки:

Значення коефіцієнтів дифузії альбуміну на цеоліті для різних чисел обертів мішалки

n, 1/с	200	300	500
D^* , м ² /с	$7 \cdot 10^{-11}$	$2,14 \cdot 10^{-10}$	$2,62 \cdot 10^{-10}$

Адсорбція в умовах механічного перемішування супроводжується збільшенням значення коефіцієнта внутрішньої дифузії пропорційно до кількості обертів мішалки. Для альбуміну порядок значень коефіцієнта масовіддачі для розглянутих гідродинамічних умов відповідав механізму внутрішньої дифузії [12].

Висновки. Приведено експериментальні дослідження кінетики адсорбції альбуміну природним цеолітом з метою очищення стічних вод молокопереробних підприємств та м'ясокомбінатів. Представлено ізотерму адсорбції та визначено кінетичні параметри процесу адсорбції в умовах механічного перемішування за чисел обертів 200-500 об/хв. Представлено математичну залежність відповідності інтенсивності масообмінного процесу до гідродинамічних умов як функцію $Sh=f(Re)$. Встановлено параметри зовнішньодифузійного та внутрішньодифузійного процесів. В умовах експерименту коефіцієнти внутрішньої дифузії альбуміну становили для 200 об/хв: $D^*_{200} = 7 \cdot 10^{-11}$ м²/с; для 300 об/хв: $D^*_{300} = 2,14 \cdot 10^{-10}$ м²/с; для 500 об/хв: $D^*_{500} = 2,62 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Статистична оцінка експериментальних та теоретичних даних показала задовільну збіжність одержаних результатів, зокрема критерій Пірсона χ^2 становив 0.94, критерій Стюдента $t = 0.002$ середньоквадратичне відхилення $SSD = 0.2$.

References

- Bordun, I. M., Ptashnyk, V. V., Chumakevych, V. O., & Mashkov, O. A. (2018). Doslidzhennya adsorbtsiyi orhanichnykh barvnykiv aktyvovanyam vuhillyam. Ekoolohichni nauki [Ecology sciences], 3(22), 77-83 [in Ukrainian].
- Kocaaga, B., Kurcuoglu, O., Tatlier, M., Dinler-Doganay, G., Batirel, S., & Güner, F. S. (2022). Pectin-Zeolite-Based Wound Dressings with Controlled Albumin Release. Polymers, 14(3), 460-480.
- Matsuska, O. V., Paranyak, R. P., Gumnytsky, YA. M. (2011). "Purification of effluents from natural proteins by natural sorbents", Naukovyy visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoyi medytsyny ta biotekhnolohiy im. Gzhytskoho, vol. 13, № 2 (2), 255-261 [in Ukrainian].
- Hyvlud, A., Sabadash, V., Gumnitsky, J., & Ripak, N. (2019). Statics and kinetics of albumin adsorption by natural zeolite. Chemistry & Chemical Technology, 1(13), 95-100.
- Gumnytsky, YA. M., Hyvlyud, A. M., Sabadash, V. V. (2015). "Kinetics of albumin adsorption by natural sorbent", Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy, vol. 47 (1), 133-137 [in Ukrainian].
- Sabadash, V., Mylanyk, O., Matsuska, O., & Gumnitsky, J. (2017). Kinetic regularities of copper ions adsorption by natural zeolite. Chemistry & Chemical Technology, 11(4), 459-462.
- Beszédes, S., Szabó, G., Géczi, G. (2012). Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 10(3), 231-235.
- Sokolov, S. V., Sokolov, S. V., Pysarenko, L. D., Pysarenko, L. D., Zhurba, V. O. (2011). Teoriya elektromagnitnoho polya i osnovy tekhniki NVCH [Theory of electromagnetic field and the basis of microwave engineering], Sumy State University, Sumy, Ukraine, 393 [in Ukrainian].
- Kalynyn, L. H. (2010). "The application of the regular-mode method for determining the electro- and thermophysical characteristics of disperse systems", Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy, 37, 170-173 [in Russian].
- Potapov, V. O., Kachalov, V. V., Mykhaylova, S. V. (2013). "To the question of calculation of internal sources of heat during microwave processing of food products", Prohresyvnii tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli, 1 (2), 73-81.
- Prates, L. L., Lei, Y., Refat, B., Zhang, W., Yu, P. (2018). Effects of heat processing methods on protein subfractions and protein degradation kinetics in dairy cattle in relation to protein molecular structure of barley grain using advanced molecular spectroscopy. Journal of Cereal Science, 80, 212-220.
- Wibowo, E., Rokhmat, M., & Abdullah, M. (2017). Reduction of seawater salinity by natural zeolite (Clinoptilolite): Adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics. Desalination, 409, 146-156.

THE EFFECT OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS ON THE KINETICS OF ALBUMIN ADSORPTION

Sabadash V.V. doctor of techn. sciences, Professor, Gumnitsky J.M. doctor of techn. sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv

Abstract. The work presents the problems of wastewater treatment of milk processing enterprises and meat plants contaminated with organic compounds and proteins. A theoretical analysis of industrial wastewater treat-

ment methods using zeolites of the Sokyrnytsia deposit was conducted. It was established that the most economically beneficial and safe is the adsorption method using a natural sorbent - zeolite, which ensures the lowest concentration of pollutants in the purified wastewater of food industry enterprises. The sorption properties of natural zeolite (clinoptilolite of the Sokyrnytsia deposit) to albumin protein were tested. A mathematical model for the flow curves of structured liquids and suspensions is given. The influence of hydrodynamics on the mass transfer process in a two-phase system has been established. The effect of the physical properties of the phases on the adsorption process was investigated. The theory of local isotropic turbulence to describe the hydrodynamic conditions of the process was used. Energy consumption for mixing, specific energy of dissipation and value of Reynolds and Euler criteria for each considered case were calculated. Experimental studies of the external diffusion adsorption process for zeolite-albumin solution suspensions for different stirring frequencies: 200, 300, and 500 rpm were presented. The mass transfer coefficients and values of the effective diffusion coefficient for the investigated adsorption system were calculated. The criterion equation for calculating the mass transfer coefficient was obtained. The coefficients of internal diffusion of albumin in zeolite at different speeds ranged from $7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ to $2.62 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ for 500 rpm. It was established that with an increase in the number of revolutions, there was an increase in the mass return coefficient and the effective diffusion coefficient. According to the presented results, the turbulation of the flow allows the evenly distributing of the sorbent particles in the reactor and reduces the diffusion resistance. Experimental studies of the external diffusion adsorption process for zeolite-albumin solution suspensions for different stirring frequencies: 200, 300, and 500 rpm are given. The kinetic curves of adsorption by natural zeolite for the external diffusion and internal diffusion processes were presented. The rheological and mechanical properties of the studied systems are considered. Regularities between deformations and stresses at a certain point of the system at the time τ have been established. A statistical evaluation of the obtained results was carried out. For the obtained results, Pearson's test χ^2 was 0.94, Student's test $t = 0.002$, mean square deviation; mean = 0.2.

Keywords: wastewater, adsorption, zeolite, albumin, kinetics, mass transfer.

Список використаної літератури

1. Дослідження адсорбції органічних барвників активованим вугіллям / Бордун І. М. та ін. // Екологічні науки. 2018., вип. 22 Т. 3. С. 77-83.
2. Pectin-Zeolite-Based Wound Dressings with Controlled Albumin Release / Kocaaga B. et al. // Polymers. – 2022., Т. 14. №. 3. Р. 460-480.
3. Мацуська О. В. Очищення стоків від білків природними сорбентами/ О. В. Мацуська, Р. П. Параняк, Я. М. Гумницький //Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. 2011., № 2(2). Т. 13.. С. 255-261
4. Statics and kinetics of albumin adsorption by natural zeolite / Hyvlud A. et al. //Chemistry & Chemical Technology. 2019., №. 13, Vol. 1. Р. 95-100.
5. Гумницький Я.М. Кінетика адсорбції альбуміну природним сорбентом/ Я.М. Гумницький, (А.М. Гивлюд), В.В.Сабадаш //Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2015. Вип. 47. Т.1, С. 133-139.
6. Beszedes S. Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge / S. Beszedes, G. Szabo, G. Geczi. // International Journal Of Engineering. 2012., №10. Р. 231–235.
7. Kinetic regularities of copper ions adsorption by natural zeolite / Sabadash V. V. et al. // Chemistry & Chemical Technology. 2017., No. 4 Vol. 11. Р. 459-462.
8. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. Т 59 посіб. / С.В. Соколов, Л.Д. Писаренко, В.О. Журба; за заг. ред. Г.С. Воробйова. – Суми : Сумський державний університет, 2011., 393 с.
9. Калинин Л. Г. Применение метода регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем / Л. Г. Калинин // Наук. праці. ОНХАТ. Одеса, 2010., Вип. 37. С. 170–173.
10. Потапов В. О. До питання розрахунку внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів/ В. О. Потапов, В. В. Качалов, С. В. Михайлова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. 2013., Вип. 1(2), С. 73-81.
11. Effects of heat processing methods on protein subfractions and protein degradation kinetics in dairy cattle in relation to protein molecular structure of barley grain using advanced molecular spectroscopy/ Prates L. L. et al //Journal of Cereal Science. – 2018., Vol. 80. Р. 212-220.
12. Wibowo E. et al. Reduction of seawater salinity by natural zeolite (Clinoptilolite): Adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics/ Wibowo E. et al. //Desalination. 2017., Vol. 409. Р. 146-156.

Отримано в редакцію 02.06.2022
Прийнято до друку 16.09.2022

Received 02.06.2022
Approved 16.09.2022