

ЗОВНІШНІЙ ТЕПЛО- І МАСООБМІН ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЕРБИ

© Атаманюк В.М., Гумницький Я.М., Мосюк М.І., 2011

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень з визначення коефіцієнтів тепло- і масообміну під час фільтраційного сушіння частинок подрібненої "енергетичної" верби за різної швидкості руху теплового агента.

Ключові слова: паливні брикети, фільтраційне сушіння, брикетування.

The results of theoretical and experimental researches are presented from determination of coefficients heat- and mass-transfer from the particles of the ground up "power" willow during the filtration drying at the different rates of movement of the heat agent.

Keywords: fuel briquettes, filtration drying, coking.

Постановка проблеми. Україна, як відомо, є енергозалежною державою, і за рахунок власних енергетичних ресурсів задовольняє меншу половину своїх потреб. Іншу половину потрібно імпортувати, зокрема російський газ [1]. Виходом з енергетичної залежності країни є ефективне використання альтернативних джерел енергії, зокрема відновлювальної. Найпридатнішим для України є отримання твердого біопалива з швидкоростучої "енергетичної" верби. Паливні брикети і гранули, виготовленні з "енергетичної" верби, використовуються в місцевих системах опалення та підприємствах з виробництва теплової та електричної енергії [2]. Підготовка сировини до процесу гранулювання або брикетування проходить в кілька стадій: це подрібнення, висушування, гранулювання або брикетування. Найбільш затратним етапом під час виготовлення паливних брикетів і гранул є процес висушування подрібненої "енергетичної" верби [2, 3]. У промисловості для висушування деревної сировини використовують сушарки барабанного типу або труби сушарки. Відомо що інтенсивність сушіння у вказаних апаратах є малоефективним, через низький рівень використання теплової енергії.

Використання фільтраційного сушіння дає змогу інтенсифікувати цей процес, за рахунок більш ефективного використання енергії теплового агента. Процес сушіння здійснюється під час профільтрування теплового агента крізь шар подрібненої "енергетичної" верби в напрямку "шар вологого матеріалу – перфорована перегородка" за рахунок перепаду тисків. Тому дослідження тепло- і масообміну між тепловим агентом і частинками подрібненої "енергетичної" верби є актуальним.

Аналіз останніх публікацій. Дослідження тепло- і масообміну під час сушіння присвячено ряд наукових праць. У цих роботах автори наводять результати досліджень тепло- і масообміну конвективного сушіння продуктів рослинного походження модельних частинок правильної форми (куля, циліндр, тоненька пластинка або ансамблю цих частинок, регулярно розташованих у шарі) [4, 5]. Як вказують автори, характер руху потоку теплового агента в каналах зернистого шару є складним, тому коефіцієнти тепло- і масовіддачі визначають на основі експериментально отриманих залежностей.

Швидкоростуча подрібнена "енергетична" верба представляє собою суміш різноманітних частинок: голкоподібних $L > 20D$, пластинчастих $15D \leq L \leq 20D$, грубих подовгуватих $L \approx 10D$, тонких, коротких $L \approx 5D$ та округлих $L \approx 2D$. Визначена пікнометричним методом пористість шару залежить від насипної ваги та гранулометричного складу подрібненої "енергетичної" верби і лежить в межах $0,750 \leq e \leq 0,881 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Для досліджуваних наважок матеріалу насипна густина становила $\rho = 0,90 \text{ кг}/\text{м}^3$, а пористість $e = 0,834 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Волога в подрібнених частинках

розміщена в основному в середині і частково на поверхні. Підчас висушування волога випаровується за рахунок підведення теплоти, а рушійною силою процесу є різниця температур між тепловим агентом і частинками. За інтенсивністю видалення вологи під час сушіння процес можна розділити на сушіння в першому і другому періоді.

Перший період це видалення поверхневої вологи. В цьому випадку маємо сумісний тепло- і масообмін, а кількість випарованої вологи є пропорційною до кількості підведеного тепла до поверхні частинок. Під час фільтраційного сушіння тепловий агент який профільтровується через шар подрібненої “енергетичної” верби рухається за складною траєкторією каналами змінного перерізу і віддає теплоту вологому матеріалу, а сам насичується вологою. Інтенсивність сушіння в першому періоді визначається зовнішніми параметрами процесу: швидкістю обтікання окремих частинок матеріалу, температурою та вологовмістом теплового агента.

Під час другого періоду поверхня частинок є сухою, волога міститься лише в тріщинах, порах і капілярах вологих частинок. Сушіння в другому періоді відбувається за рахунок молекулярної дифузії вологи з середини частинки до її поверхні, а видалення вологи за межі шару – за рахунок вимушеної конвективної дифузії.

Враховуючи те, що у першому періоді сушіння випаровування вологи відбувається з поверхні окремих частинок, а в другому - поверхня частинок є сухою, ми досліджували зовнішній теплообмін між тепловим агентом як вологих, так і сухих частинок.

Експерименти проводилися на установці та за методикою наведеною в [6]. Для дослідження зовнішнього теплообміну висушену до постійної ваги наважку подрібненої “енергетичної” верби завантажували в контейнер циліндричної форми, який виготовлений із теплоізоляційного матеріалу (фторопласту). Щоб температура верхніх і нижніх шарів подрібненої енергетичної верби була однаковою і тепловий агент фільтрувався рівномірно по всій площині контейнера дослідження поводити в короткому шарі матеріалу, висота якого становила 26 мм.

Над і під шаром на висоті 20-30мм встановлювали термомари. Вимірювання температури проводилися за допомогою восьми каналного приладу ПТ-108 з виводом інформації на комп’ютер. Температура теплового агента вимірювалась на виході з шару подрібненої “енергетичної” верби в шести точках: у центрі контейнера і на відстані 5, 10, 15, 20, 25 мм від стінки і визначалась як середнє арифметичне з шести значень. Над шаром матеріалу температура підтримувалось постійною 60°C з точністю $\pm 0,5^\circ\text{C}$, за допомогою терморегулятора РТ-100 і двох термомар, які були розміщені над шаром матеріалу в різних точках (в центрі контейнера і 30мм від його стінки).

Зовнішній теплообмін теплового агента із висушеними до постійної маси сухими частинками подрібненої “енергетичної” верби. Експериментально визначені усереднені значення температури теплового агента на виході із шару матеріалу наведено на рисунку 1. Коефіцієнт тепловіддачі для подрібненої “енергетичної” верби розраховували за відомими залежностями [7] і їх залежність від дійсної швидкості фільтрування теплового агента наведено на рисунку 2. Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі є усереднені по шару.

Експериментально виміряти температури поверхні частинок подрібненої “енергетичної” верби є неможливо, тому вона оцінювалась на основі аналітичних залежностей для середньої температури шару та температури на поверхні твердої частинки, наведених в [7] для частинок циліндричної форми. Тому середню температуру поверхні твердих частинок T_p визначали наступним чином. З рівняння теплового балансу визначали середню температуру частинок \bar{T} :

$$\Delta Q = m \cdot c_s \cdot (\bar{T} - T_0) \quad (1)$$

де m – наважка подрібненої верби; c_s – теплоємність частинок подрібненої верби; \bar{T} – середня температура шару; T_0 – початкова температура частинки.

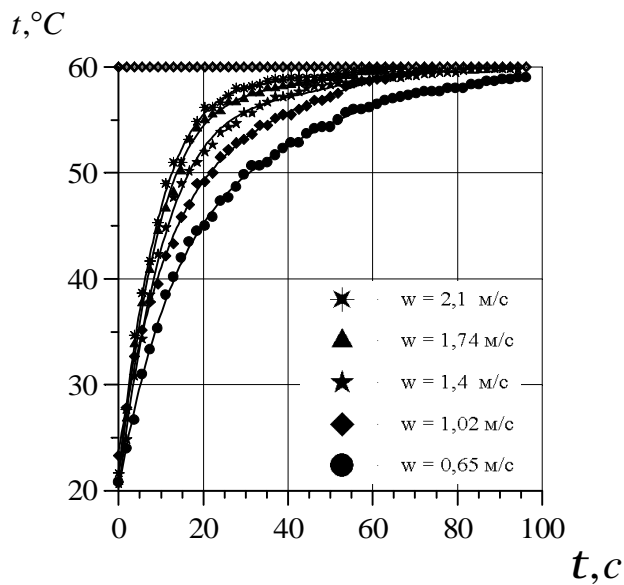


Рис. 1. Зміна температури теплового агента на вході і виході з шару сухої подрібненої енергетичної верби

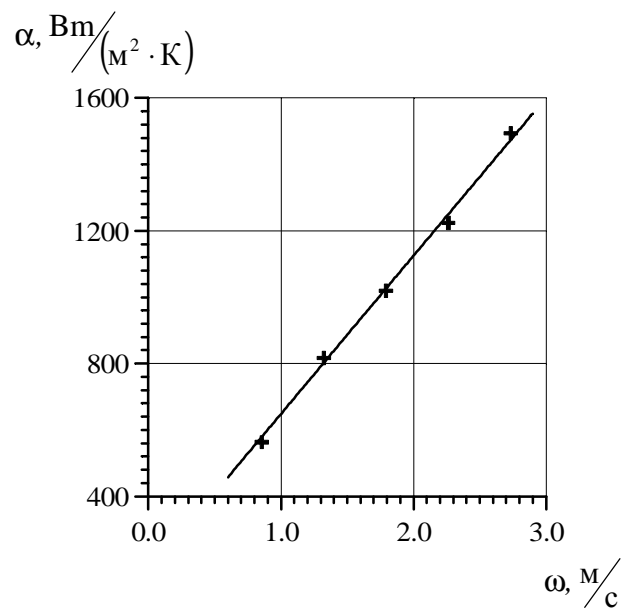


Рис. 2. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості

Вважали, що температура теплового агента однакова з усіх сторін частинки. Приймали, що розподіл температурного поля по об'єму частинки має параболічний характер, і температуру на поверхні частинки визначали із залежності [7]:

$$T = \bar{t} - \left(\bar{t} - T_0 \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \right) \cdot \left(1 - \frac{r}{R} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \quad (2)$$

де \bar{t} – середня температура теплового агента; R , r – радіус частинки і біжучий радіус відповідно ($0 < r \leq R$); μ_n – корінь характеристичного рівняння; Fo – критерій Фур'є.

На основі експериментальних значень наведених на рис. 1 розраховували значення коефіцієнтів тепловіддачі α згідно з рівнянням тепловіддачі [8]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (\bar{t} - T_n) \cdot \Delta t} \quad (3)$$

де F – ефективна поверхня тепло- і масообміну; Δt – зміна часу.

Температуру теплового агента \bar{t} приймали як середньоарифметичну на вході і виході з шару, згідно із замірами, показаними на рис. 1.

Узагальнення експериментальних результатів наведених на рис. 2 проводили згідно залежностей [8]:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \quad (4)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{l}$ – критерій Нуссельта; $Re = \frac{\omega \cdot d_e}{\nu}$ – критерій Рейнольдса; $Pr = \frac{\eta}{a}$ – критерій Прандтля; η – коефіцієнт кінематичної в'язкості; a – коефіцієнт температуропровідності; ω – дійсна швидкість фільтрування теплового агента; d_e – еквівалентний діаметр каналів між частинками.

Враховуючи те, що фізичні параметри повітря змінюються у вузькому діапазоні, згідно рекомендаціями [8] приймаємо:

$$Nu \approx Pr^{0,33} \quad (5)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів "А" та "n" в залежності (4) експериментальні значення представляли у логарифмічній системі координат у вигляді (рис. 3):

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re), \quad (6)$$

Де кожна точка є середнім арифметичним значенням мінімум трьох експериментів.

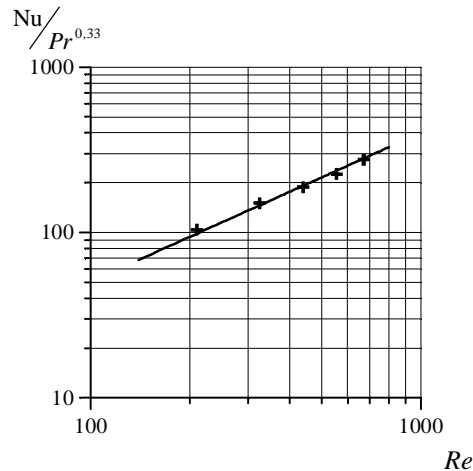


Рис. 3. Залежність $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$
для короткого шару матеріалу ($H=26$ мм) за температури $60^{\circ}C$

Визначені, із графічної залежності невідомі коефіцієнти А і n, подані в таблиці. Отримані нами значення корелюються із значеннями, отриманими іншими авторами, зокрема наведеними у роботі [9].

Тоді рівняння (4) можна представити у вигляді

$$Nu = 0,8 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \quad (7)$$

Відомо, що на розмір каналів між частинками, які формують шар, впливає їх діаметр і форма. Авторами роботи [10] доказано цей вплив під час дослідження гідродинаміки стаціонарного шару, тому доцільно його враховувати під час визначення коефіцієнтів тепло- і масовіддачі. Тоді у критеріальне рівняння (4) доцільно ввести геометричний симплекс $(d_e/D_a)^{0,67}$, щоби врахувати вплив геометричних розмірів частинок і контейнера на процес теплообміну, а кінцеве рівняння матиме вигляд

$$Nu = 1,25 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_e}{D_a}\right)^{0,67} \quad (8)$$

Отримані значення дають змогу прогнозувати значення числа Нуссельта (а відповідно і коефіцієнти тепловіддачі) з точністю до $\pm 10-13$ % в межах зміни числа Рейнольдса вказаних в таблиці.

Зовнішній масообмін під час фільтраційного сушіння подрібненої “енергетичної” верби.

Відомо [11], що фільтраційне сушіння носить зональний характер, тому дослідження тепломасообміну вологої подрібненої енергетичної верби також проводили в короткому шарі, щоб виключити переміщення зони масообміну. Сушіння проводили шляхом профільтрування теплового агента в напрямі “вологий матеріал – перфорована перегородка” протягом 20 с. Час між завершенням сушіння і його зважуванням складав не більше 10–15 с. Для уникнення випаровування вологи під час зважування контейнер з матеріалом накривали кришкою.

Коефіцієнти масовіддачі і тепловіддачі під час фільтраційного сушіння визначали із залежностей наведених у [8]:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta \cdot F \cdot \left(x_{\text{нас}} - \frac{x_{\text{нас}} + x_0}{2} \right) \cdot \rho; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot r = \alpha \cdot F \cdot \left(\frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вих}}}{2} - t_{\text{м.т}} \right), \quad (10)$$

де $x_0, x_{\text{нас}}$ – відповідно початковий вологовміст теплового агента і в стані насичення; $t_{\text{вх}}, t_{\text{вих}}, t_{\text{м.т}}$ – відповідно температура теплового агента на вході, виході із шару і мокрого термометра; β – коефіцієнт масовіддачі.

Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 4 і 5 відповідно.

Аналогічно, як і для сухої подрібненої верби коефіцієнт тепловіддачі лінійно зростає з ростом дійсної швидкості руху теплового агента, однак для вологого матеріалу коефіцієнт тепловіддачі є на 30% більшим, ніж для сухого матеріалу, за однакових гідродинамічних умов, що пояснюється кращою теплопровідністю вологого матеріалу. Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі є усередненими по шару.

Узагальнення експериментальних результатів наведених на рис. 4 проводили за рівнянням (4), а наведених на рис. 5 – за рівнянням:

$$Sh = A \cdot Re^n \cdot Sc^m \quad (11)$$

де $Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D}$ – критерій Шервуда; D – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітря; $Sc = \frac{\nu}{D}$ – критерій Шмідта.

Аналогічно, як і для теплообміну, згідно рекомендацій [8] приймали, що $Sh \sim Sc^{0,33}$.

Невідомі значення коефіцієнтів A та n визначені із графічної залежності $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$, отриманої на основі експериментальних даних (рис. 5) наведені у таблиці.

Значення коефіцієнтів "А" і "n" у залежності (1) і (10) для вологого матеріалу

Матеріал	Re	A	n
Сухий	100 ÷ 1000	0,8	0,9
Вологий	100 ÷ 1000	1	0,9

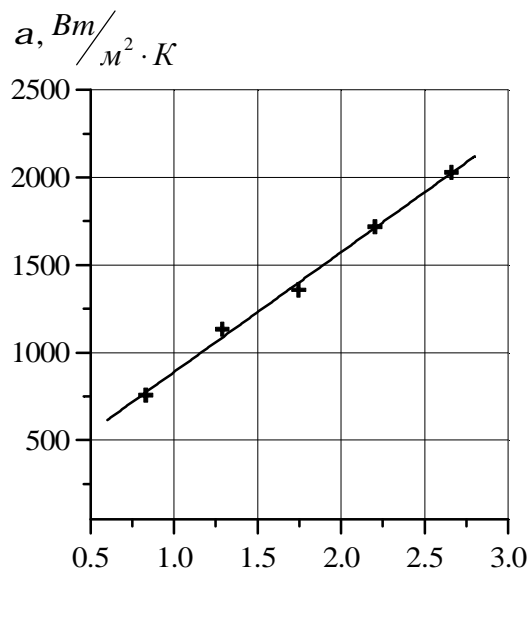


Рис 4. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі a від дійсної швидкості w для вологого матеріалу

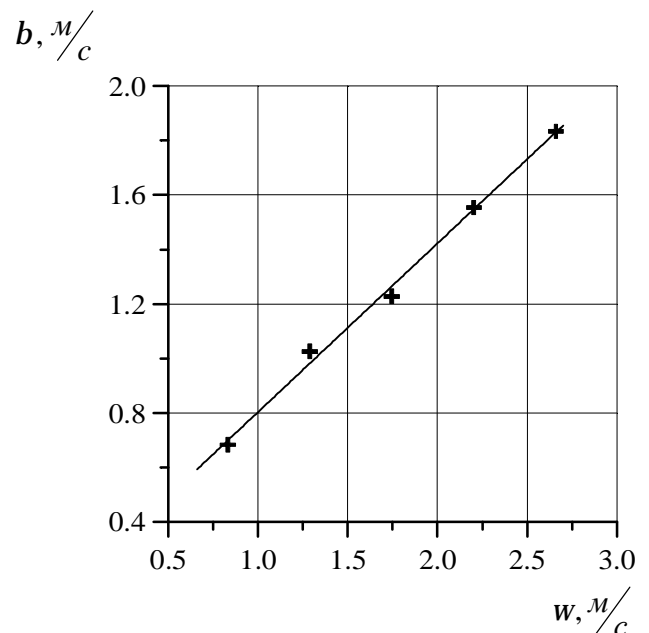


Рис 5. Залежність коефіцієнтів масовіддачі β від дійсної швидкості w

Для вологого шару подрібненої “енергетичної” верби узагальнення експериментальних значень наведених на рис. 4 і 5, з врахуванням впливу співвідношення еквівалентного діаметру каналів між частинками до діаметра контейнера, дало змогу представити розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів тепловіддачі і масовіддачі у тонкому шарі у вигляді безрозмірних комплексів:

$$Nu = 7,73 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_e}{D_a} \right)^{0,67} \quad (11)$$

$$Sh = 7,73 \cdot Re^{0,9} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left(\frac{d_e}{D_a} \right)^{0,67} \quad (12)$$

Підчас фільтраційного сушіння у першому періоді відбувається одночасно передача тепла від теплового агента до поверхні висушуваного матеріалу та передача вологи з поверхні частинок до теплового агента. Обидва процеси належать до конвективних: конвективний теплообмін та конвективний масообмін. Характерним для обох процесів є залежність густини потоку тепла чи маси від поверхні висушуваного матеріалу від різниці температур або концентрацій (вологовмісту). Узагальнення експериментальних даних з теплообміну і масообміну за допомогою критеріальних залежностей показало, що для обох випадків рівняння в безрозмірних комплексах, характеризуються однаковими показниками степеня біля числа Рейнольдса, що вказує на однаковий вплив гідродинаміки на ці коефіцієнти. Як приклад наводимо графічну залежність

$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ та $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$ на одному графіку рис. 6. Не дивлячись на різну природу теплообмінних і масообмінних процесів, яка оцінюється числами Прандтля і Шмідта, експериментально визначені комплекси $\frac{Nu}{Pr^{0,33}}$ і $\frac{Sh}{Sc^{0,33}}$ співпадають між собою для однакових чисел Рейнольдса (кожна точка на рис. 6 отримана усередненням, мінімум, трьох експериментів).

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}}, \frac{Sh}{Sc^{0,33}}$$

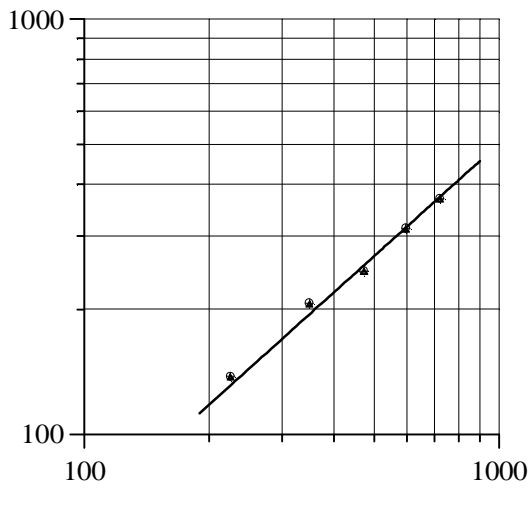


Рис 6. Узагальнення тепло і масообміну під час фільтраційного сушіння (перший період)

Максимальна похибка і для вологої подрібненої енергетичної верби також не перевищує $\pm 10\%$.

Висновок. Виведені залежності (7), (11) і (12) дають змогу визначити коефіцієнти тепловіддачі і масовіддачі під час фільтраційного сушіння в стаціонарному шарі подрібненої “енергетичної” верби у першому періоді. Отримані розрахункові залежності дають нам змогу прогнозувати затрати теплової енергії, розрахувати оптимальні параметри процесу, експлуатаційні

затрати на сушіння і визначити основні конструктивні розміри сушильної установки на етапі її проектування та встановити економічну доцільність застосування фільтраційного методу сушіння.

1. Кудря С.О. Законодавча база відновлюваної енергетики в Україні /С.О. Кудря// Відновлювана енергетика XXI століття: матер. 10-ї ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф. 2009 р. [Електронний ресурс].– Доступний з http://www.ive.org.ua/conference_2009/kudrya%20res%20nikolaevka.pdf. 2. Науково-технічний центр "Біомаса". – План дій по біомасі для України. – К., 2009. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.biomass.kiev.ua>, Зелена планета. Біоенерго-ресурс. Енергетичні плантації 2007 р. – С. 7. 3. Науково-технічний центр "Біомаса". – План дій по біомасі для України. – К., 2009. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.biomass.kiev.ua>. 4. Сорочинський В.С. Тепломасообмен единичной зерновки в процессах сушки и охлаждения // Труды второй Международной научной-практической конференции «Современные энергосберегающие технологии (Сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». – М., 2005. – Т.1. – С.229–232. 5. Снежкін Ю.Ф., Боряк Л.А., Шапарь Р.О. Вплив процесу сушіння на теплообмін // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, №4. – С.346–349. 6. Гідродинаміка процесу фільтраційного сушіння матеріалів, для яких властиве явище зсідання / Я.М. Ханік, Я.М. Гумницький, В.М. Атаманюк, П.В. Білей // Науковий вісник: Проблема деревообробного виробництва: зб. наук.-техн. пр. – Вип.2. – Львів: УкрДЛТУ, 1994. – С.29–39. 7. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.– Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с. 8. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2-х кн. – М.: Химия, 1981. – 812 с. 9. Кунин Д., Левенишпиль О. Промышленное псевдооживление. США, 1969; пер. с англ.; под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонького. – М.: Химия, 1976. – 448 с. 10. Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару // Хімічна промисловість України. – 2002. – №6. – С. 38–42. 11. Ханык Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. – Львов, 1992. – 426 с.

УДК 504.062:574, 504.7:574, 66.02

О.А. Нагурський, Я.М. Гумницький
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра екології та охорони навколишнього середовища

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИФУЗІЇ РЕЧОВИНИ В ПРОЦЕСІ РОЗЧИНЕННЯ ЧАСТИНОК, ОБМЕЖЕНИХ НАПІВПРОНИКНОЮ ПЛОСКОЮ МЕМБРАНОЮ

Ї Нагурський О.А., Гумницький Я.М., 2011

Проведено теоретичні дослідження дифузійного руху речовини в процесі її розчинення через напівпроникну плоску мембрану. Отримано математичну модель у критеріальній формі, яка дає можливість прогнозувати кінетику процесу. Побудовано теоретичні залежності вивільнення хлориду калію через нерозчинну плоску полімерну оболонку для різних значень критеріїв Bi та Sh .

Ключові слова: дифузія, розчинення, плоска мембрана.

Theoretical researches of diffusive motion of matter are conducted in the process of its dissolution through a semi-permeable flat membrane. A mathematical model in a criterion form, which enables to forecast kinetics of process, is got. Theoretical dependences of freeing of chloride are built to potassium through an insoluble flat polymeric shell for the different values of criteria of Bi and Sh .

Keywords: diffusion, dissolution, flat membrane.

Постановка проблеми. Одним із напрямів капсулювання є створення речовин із контрольованою або пролонгованою розчинністю [1–3]. Мембрана на поверхні капсульованих частинок