

В. М. Атаманюк, Д. П. Кіндзера, А. С. Сенік
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії

ТЕПЛОМАСООБМІН ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА АДСОРБЕНТІВ З ТОРФОВОЇ СИРОВИНИ

© Атаманюк В. М., Кіндзера Д. П., Сенік А. С., 2015

Наведено результати досліджень кінетики, динаміки, швидкості, інтенсивності фільтраційного сушіння торфу. На основі узагальнення результатів досліджень отримані залежності: для прогнозування сушіння у періодах повного та часткового насичення теплового агента вологою, для розрахунків часу формування фронту вологовмісту матеріалу, вологовмісту теплового агента, розподілу вологовмісту в шарі торфу, крізь який фільтрується тепловий агент у період формування фронту масообміну (до часу t_1).

Ключові слова: фільтраційне сушіння, торф, адсорбент, кінетика, динаміка, інтенсивність, фронт масообміну.

The article presents the experimental results of the kinetics, dynamics, speed and intensity of filtration drying of peat. On the basis of summary of the research results, authors obtained the equations: for prediction of drying in periods of complete and partial saturation of the heat agent with damp, for calculation of time of forming the front of moisture content of the material, moisture content of the heat agent, distribution of moisture content in a layer of peat, which is filtered by thermal agent during the formation of the mass transfer front (to time t_1).

Keywords: filtration drying, peat, adsorbents, kinetics, dynamics, intensity, mass transfer front.

Постановка проблеми. Актуальною задачею сьогодення, зумовленою виробничими потребами та екологічною ситуацією, є виробництво високоякісних, недорогих сорбентів з високою поглинальною здатністю щодо нафтопродуктів, які можна було б регенерувати та за відпрацювання утилізувати. В світовій практиці застосовують близько 200 видів сорбентів природного та штучного походження для ліквідації нафтових забруднень [4 – 6], а потреби вітчизняних споживачів задовольняються значною мірою імпортними поставками [1, 2]. Промислове виготовлення адсорбентів в Україні має бути насамперед зорієнтоване на виробництво з місцевих сировинних ресурсів.

У виробництві адсорбентів важливим є впровадження ресурсо- та енергоощадних технологій, які б дали змогу забезпечити мінімальні витрати та втрати сировини, зменшити енергетичні затрати на окремих виробничих стадіях. Енергозатрати на сушіння сировини є значними і зумовлені високою вологістю торфу, а також використанням морально і фізично застарілого сушильного обладнання, яке характеризується низькою ефективністю і, відповідно, перевитратами теплової енергії в 2–3 рази більшими, ніж це потрібно для перетворення вологи на пару.

Аналіз джерел літератури. Торф, поклади якого в Україні є значними (виявлено і розвідано 1562 торф'яних родовищ загальною площею 639,5 тис. га запасами 1853 млн. тонн), є цінною, доступною сировиною для виробництва адсорбентів, оскільки вміст вуглецю в деяких сортах останнього досягає 60 %, а велика кількість та різноманітність активних функціональних груп (COOH, -OH) в твердому компоненті торфу та його пориста структура зумовлює високі сорбційні

та іонообмінні якості [3]. Адсорбенти з торфу є екологічно чистими, проявляють гідрофобні властивості, втримуються на поверхні води протягом кількох діб, легко регенеруються та утилізуються [3, 7]. Процес виготовлення адсорбентів з торфу є багатостадійним, тривалим в часі, ресурсо- та енергозатратним. Енергозатрати на етапі підготування сировини пов'язані з реалізацією процесів подрібнення, перемішування з модифікаторами і сполучними речовинами та сушіння, який є складним тепломасообмінним процесом, від успішної реалізації якого залежать собівартість та якість готової продукції. Для зменшення енергозатрат на стадії сушіння автори робіт [10, 11] пропонують зневоднювати торф у сушарках фільтраційного типу з одночасним дотриманням раціональних параметрів проведення останнього.

Дослідженню процесів тепло- та масообміну під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів присвячено низку наукових праць. Автори робіт [8–12] дослідили кінетику фільтраційного сушіння різних дисперсних матеріалів та зробили висновки про вплив висоти шару, швидкості руху, температури теплового агента, розміру частинок на швидкість сушіння. В роботах [11, 13–15] досліджено особливості механізму фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, отримано залежності для прогнозування процесу у періодах повного та часткового насичення теплового агента вологою. Проте наведені в цих роботах результати стосуються конкретних матеріалів і застосувати їх для інших матеріалів, відмінних за структурною будовою і формою частинок є неможливо внаслідок великої похибки між експериментальними і теоретично розрахованими значеннями. Тому для моделювання процесів масообміну під час фільтраційного сушіння торфу необхідно дослідити кінетику, динаміку, швидкість сушіння та інтенсивність видалення вологи з шарів матеріалу.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження тепло- масообміну, кінетики, динаміки, швидкості фільтраційного сушіння торфу та інтенсивності видалення вологи з шарів матеріалу, а також отримання залежностей для розрахунків часу формування фронту вологовмісту матеріалу, вологовмісту теплового агента, розподілу вологовмісту в шарі торфу, крізь який фільтрується тепловий агент у період формування фронту масообміну (до часу t_1).

Результати досліджень. Як сировину для отримання адсорбентів використовували фрезерний торф із початковою вологістю 3,3 кг/кг та гранулометричним складом 2–5 мм. Для знаходження раціональних параметрів фільтраційного сушіння торфу ми вивчали вплив висоти шару матеріалу та параметрів процесу (температури та швидкості фільтрування теплового агента) на тривалість процесу. На рис. 1 наведено результати досліджень зміни поточної вологості торфу в часі для висот шару матеріалу 40; 60; 80; 100·10⁻³ м.

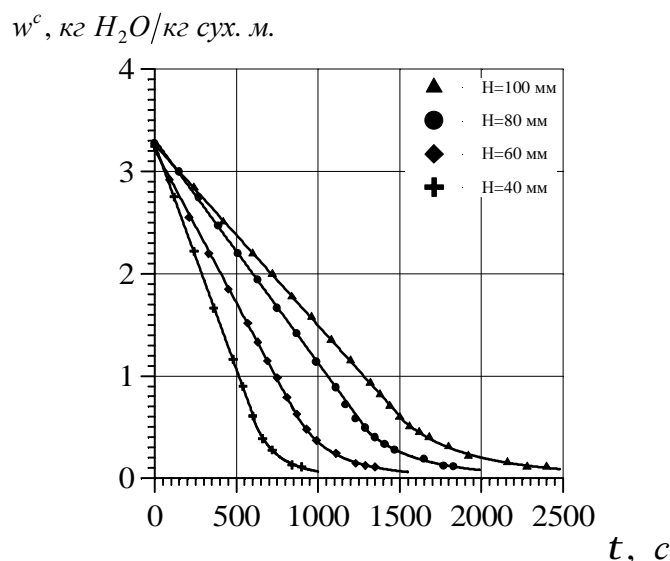


Рис. 1. Кінетика фільтраційного сушіння торфу
($T = 50^\circ C$; $u_0 = 1,94$ м/с)

З графічної залежності видно, що період механічного витіснення вологи з матеріалу є відсутнім, що пояснюється невисоким початковим вологовмістом торфу (3,3 кг/кг), який був об'єктом досліджень та природою матеріалу (торф – капілярно-пористий колоїдний матеріал, який характеризується наявністю значної кількості осмотично і адсорбційно зв'язаної вологи, що розташована переважно у внутрішніх порах і капілярах). Фільтраційне сушіння торфу відбувається у періодах повного та часткового насичення теплового агента вологою, в яких волога з торфу видаляється лише внаслідок фазового перетворення. Оскільки механічно витіснити вологу з торфу неможливо, то процес сушіння починається із виділення вологи із поверхні частинок, що створює передумови інтенсифікації процесу за рахунок технологічних параметрів теплового агенту.

Узагальнення експериментальних даних кінетики дало змогу отримати залежності для прогнозування фільтраційного сушіння торфу:

– в періоді повного насичення теплового агента вологою:

$$W = W_0 \cdot (1 - 13,4 \cdot 10^{-23} \cdot T^{6,93} \cdot \Delta P^{0,23} \cdot H^{-0,86} \cdot \tau \cdot e^{-27,14 \cdot H}) \quad (1)$$

– в періоді часткового насичення теплового агента вологою:

$$W = (W_{кр.} - W_p) \cdot e^{-1,8 \cdot N \cdot (t - t_{кр.})} + W_p \quad (2)$$

Важливою характеристикою процесу фільтраційного сушіння є динаміка видалення вологи із шару, яка характеризує насичення вологою теплового агенту. Результати дослідження динаміки фільтраційного сушіння торфу за умови постійної швидкості фільтрування теплового агенту крізь шари торфу різної висоти наведено на рис. 2, для чого експериментальні дані подавали у вигляді залежності зміни залишкової маси вологи в шарі торфу від часу $W = f(t)$, з якої інтенсивність сушіння визначається за тангенсом кута нахилу прямолінійної частини кривої до осі абсцис. З графічних залежностей видно, що інтенсивність процесу сушіння не залежить від висот шару торфу, про що свідчить паралельність прямолінійних частин кривих до осі абсцис.

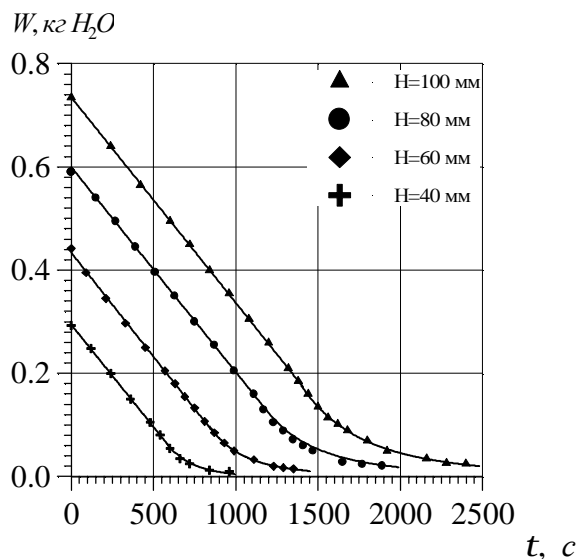


Рис. 2. Динаміка видалення вологи з торфу під час фільтраційного сушіння

Динаміка фільтраційного сушіння торфу є аналогічною до інших масообмінних процесів з твердою фазою, таких як адсорбція, іонний обмін, розчинення, екстрагування з твердої фази. Однак перелічені масообмінні процеси відбуваються практично в ізотермічних умовах, натомість сушіння є складним тепломасообмінним процесом, коли температура теплового агента змінюється від початкового значення до температури мокрого термометра.

Для розрахунку продуктивності сушильного обладнання та прогнозування енергетичних затрат на реалізацію процесу фільтраційного сушіння торфу важливим є визначення швидкості сушіння залежно від поточного вологовмісту матеріалу.

На рис. 3 наведено залежність швидкості сушіння від поточного вологовмісту вологого торфу $\frac{dw^c}{dt} = f(w^c)$ для висот шару 40, 60, 80 та 100 мм.

Аналіз графічних залежностей на рис. 3 підтверджує наявність зонального механізму фільтраційного сушіння, який дослідив та описав автор роботи [9]. Для усіх висот шару торфу криві швидкості характеризуються наявністю кількох ділянок. Лінія c–d характеризує період повного насичення теплового агенту вологою, який є тривалим. З часом фронт масообміну переміщується в напрямку руху теплового агенту і досягає перфорованої перегородки. Внаслідок неможливості розширення фронту масообміну насичення теплового агента вологою зменшується і настає період часткового його насичення вологою (ділянка d–e). Лінія e–f вказує на завершення сушіння торфу в першому періоді та сушіння лише в другому періоді.

З графічної залежності видно, що із зростанням висоти шару торфу швидкість сушіння зменшується, що не відповідає фізичній суті процесу. Кількість вологи, яка виноситься тепловим агентом із шару торфу, залежить від його сушильного потенціалу і об'ємної витрати, тому якщо швидкість фільтрування і температура теплового агенту є сталими для різних висот шару (умови експериментів), то і швидкість сушіння повинна бути однаковою незалежно від висоти. Однак таке явище пояснюється тим, що вологовміст торфу визначали ваговим методом і за однакової кількості залишкової вологи в шарі матеріалу маса сухого торфу була тим більшою, чим вищою була висота шару.

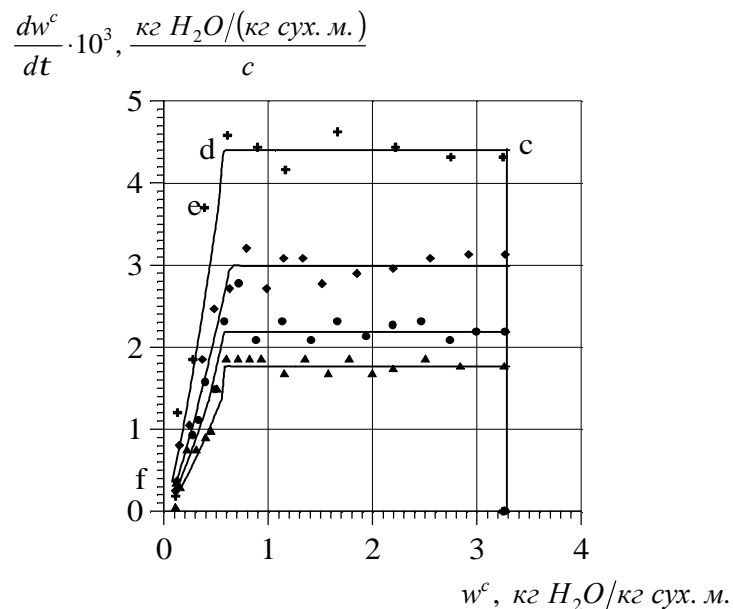


Рис. 3. Швидкість сушіння для різних висот шару торфу (позначення відповідають рис. 1)

На рис. 4 наведено графічну залежність $\frac{dW}{dt} = f(w^c)$, що відображає інтенсивність видалення вологи із шарів торфу протягом сушіння. З графічної залежності видно, що інтенсивність видалення вологи із шару торфу не залежить від висоти шару торфу, що, своєю чергою, також підтверджує зональний механізм фільтраційного сушіння.

Для опису процесу фільтраційного сушіння торфу необхідно було вирішити дві задачі, а саме: визначити розподіл вологовмісту у шарі торфу та теплового агента по висоті шару та визначити поле концентрацій у шарі останнього. Для цього розглядався шар вологого торфу заввишки H , крізь який фільтрували тепловий агент із швидкістю u . Приймали, що шар є монодисперсним з розміром частинок d_v . На рис. 5 наведено схему зміни вологовмісту торфу за часом та за висотою його шару z . Задача являє собою одновимірне концентраційне поле.

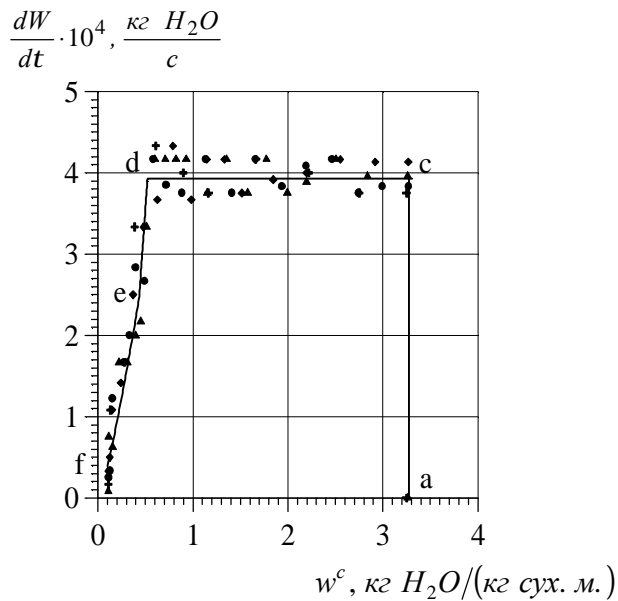


Рис. 4. Інтенсивність видалення вологи із шарів торфу (позначення відповідають рис. 1)

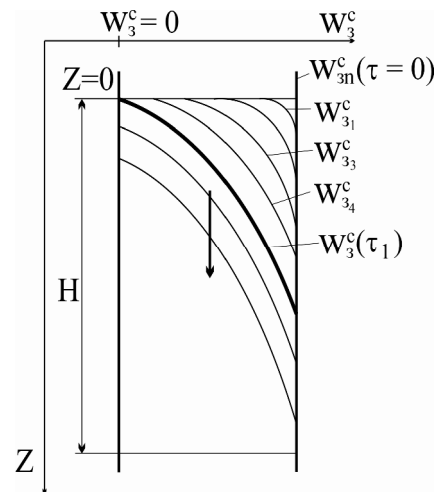


Рис. 5. Розрахункова схема зміни вологовмісту за часом та висотою шару торфу

Розв'язати було необхідно систему диференціальних рівнянь, що описують поле вологовмісту висушуваного матеріалу в просторі і часі під час фільтраційного сушіння:

$$\begin{cases} (1-e) \cdot r_s \cdot \frac{\partial w_3^c}{\partial t} = -b \cdot s \cdot (x_{нас} - x); \\ u \cdot \frac{\partial x}{\partial z} \cdot r + (1-e) \cdot r_s \cdot \frac{\partial w_3^c}{\partial t} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Перше рівняння системи визначає швидкість сушіння частинок шару у першому періоді, віднесено до одиниці висоти шару, на якій вологовміст теплового агента дорівнює x . Друге рівняння системи являє собою баланс вологи на одиниці висоти шару торфу. Перший член лівої частини рівняння характеризує зміну вологи у теплового агенті, другий – зміну вологи в одиниці висоти шару торфу.

Систему рівнянь (3) було доповнено крайовими умовами

$$x(0, t) = x_n; \quad x(\infty, t) = x_{нас}; \quad w_3^c(z, 0) = w_{3n}^c \quad (4)$$

Для випадку $z = 0$ (поверхневий шар матеріалу) розв'язком системи є залежність

$$w_3^c(0, t) = w_{3n}^c - \frac{b \cdot s \cdot (x_{нас} - x_n) \cdot r}{(1-e) \cdot r_s} \cdot t, \quad (5)$$

яка показує, що на поверхні дисперсного матеріалу вологовміст W_3^c змінюється залежно від t за лінійним законом. За досягнення $w_3^c(0, t) = 0$ (величина "0" означає відсутність вологи на зовнішній поверхні частинки) закінчується формування фронту вологовмісту на поверхні.

Час формування фронту вологовмісту матеріалу t_1 розраховують за залежністю (5):

$$t_1 = \frac{w_{3n}^c \cdot (1-e) \cdot r_s}{b \cdot s \cdot (x_{нас} - x_n) \cdot r} \quad (6)$$

З рис. 5 видно, що завершення формування фронту вологовмісту відповідає часу t_1 .

Розв'язок системи рівнянь (3) дає змогу визначити:

– вологовміст теплового агента x :

$$x = x_{nac} + \frac{(1-e) \cdot r_s}{b \cdot s \cdot r} \cdot \frac{\partial w_3^c}{\partial t}; \quad (7)$$

– розподілення вологовмісту твердого матеріалу, крізь який фільтрується тепловий агент:

$$1 - \frac{w_3^c}{w_{3n}^c} = \frac{b \cdot s \cdot (x_{nac} - x_n) \cdot r}{w_{3n}^c \cdot (1-e) \cdot r_s} \cdot t \cdot e^{-\frac{b \cdot s}{u} \cdot z} \quad (8)$$

– розподілення вологовмісту у шарі торфу, крізь який фільтрується тепловий агент у період формування фронту (до часу t_1):

$$1 - \frac{w_3^c}{w_{3n}^c} = \frac{t}{t_1} \cdot e^{-\frac{b \cdot s}{u} \cdot z}. \quad (9)$$

Висновок. Досліджено тепло- і масообмін, кінетику, динаміку та швидкість фільтраційного сушіння торфу, на основі чого підтверджено зональний механізм фільтраційного сушіння торфу. Отримано залежності (6 – 9), які дають змогу розрахувати: час формування фронту вологовмісту матеріалу t_1 ; вологовміст теплового агенту; розподіл вологовмісту в шарі торфу, через який фільтрується тепловий агент у період формування фронту масообміну (до часу t_1).

1. Мальований М. С. Очищення води від нафтопродуктів природними та модифікованими сорбентами / М. С. Мальований // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. – 2007. – № 4. – С. 61 – 65. 2. Арене В. Ж. Эффективные сорбенты для ликвидации нефтяных разливов / В. Ж. Арене, О. М. Гридин // *Экология и промышленность России*. – 2006. – № 2. – С. 30 – 37. 3. Пастухова Н. О. Сорбенти на основі торфу / Н. О. Пастухова, О. В. Пастухов // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць*. – 2007. – № 4 (40), част. 3. – С. 146–152. 4. Венрикова Е. В. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей / Е. В. Венрикова, Е. А. Терещенко, Н. В. Чесноков [и др.] // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. – 2010. – №5. – С. 285 – 304. 5. Дрожникова А. В. Екологічно безпечні нафтові сорбенти / А. В. Дрожникова, Т. В. Михалевська // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. – 2007. – №3. – С. 42 – 44. 6. Ивасишин П. Л. Ликвидация последствий разливов нефти посредством биоразлагающих сорбентов / П. Л. Ивасишин // *Нефтяное хозяйство*. – 2009. – №5. – С. 112 – 113. 7. Кожанова Г. А. Методи ліквідації нафтового забруднення з застосуванням сорбенту “Екторф” / Г. А. Кожанова, В. І. Соловійов та ін. // *Вісник Одеського національного університету*. – 2001. – № 2. – С. 154 – 157. 8. Дулеба В. П. Фільтраційне сушіння осажденного поліакриламиду [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08 / В. П. Дулеба; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 1997. – 20 с. 9. Гузьова І. О. Гідродинаміка та тепломасообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / І. О. Гузьова; [НУ Львівська політехніка]. – Львів: 2001, – 19 с. 10. Кіндзера Д. П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / Д. П. Кіндзера; нац. ун-т “Львівська політехніка”. – Львів: 2003, – 20 с. 11. Атаманюк В. М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. – Дисертація доктора. техн. наук. Львів; 2007. 12. Римар Т. І. Сушіння глини у нерухомому шарі [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08. / Т. І. Римар; Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – Львів, 2008. – 19 с. 13. Атаманюк В. М. Масовіддача у першому періоді фільтраційного сушіння дрібнодисперсних матеріалів [Текст] / Д. М. Симак, В. М. Атаманюк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* // Харків, 2011, – 6/6 (54), – С. 14–22. 14. Мосюк М. І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої “енергетичної” верби в стаціонарному шарі [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08. / М. І. Мосюк; Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – Львів, 2012. – 22 с. 15. Атаманюк В. М. Кінетика фільтраційного сушіння шлаку теплових електростанцій [Текст] / В. М. Атаманюк, І. Р. Барна // *Збірник наукових праць ОНАХТ*. – Одеса. – 2012, – Т.2, Вип.41, – С. 89–93.