

## ГІДРОДИНАМІКА РУХУ ТЕПЛОВОГО АГЕНТУ КРІЗЬ СТАЦІОНАРНІ ШАРИ ВОЛОГОГО ТА СУХОГО ТОРФУ

© Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М., Госовський Р. Р., 2018

Для зменшення енергозатрат процесу сушіння торфу та підвищення якості продукту запропоновано метод фільтраційного сушіння. Проаналізовано теоретичні аспекти визначення втрат тиску в стаціонарних шарах пористих матеріалів. Досліджено гідродинаміку руху теплового агенту крізь стаціонарні шари вологого і сухого шарів торфу. На основі узагальнення результатів експериментальних досліджень отримано залежність для розрахунку втрат тиску в стаціонарному шарі торфу під час профільтрування крізь нього теплового агенту. Виведене рівняння є корисним на етапі проектування обладнання для сушіння торфу, оскільки дає змогу теоретично розрахувати втрати тиску в шарах торфу за подібних гідродинамічних умов у межах досліджуваних висот шарів матеріалу від  $20 \cdot 10^{-3}$  м до  $50 \cdot 10^{-3}$  м.

**Ключові слова:** торф, метод фільтраційного сушіння, пориста структура, гідродинаміка, потік теплового агенту, втрати тиску в стаціонарному шарі, гідродинамічні умови.

D. P. Kindzera, V. M. Atamanyuk, R. R. Hosovkyi

## HYDRODYNAMICS OF THE HEAT AGENT FLOW THROUGH STATIONARY LAYERS OF THE WET AND DRY PEAT

© Kindzera D. P., Atamanyuk V. M., Hosovkyi R. R., 2018

To reduce power inputs during the peat drying and to improve the quality of the product the filtration method of drying has been proposed. Theoretical aspects of the pressure loss determination in the stationary layers of porous materials have been analyzed. The hydrodynamics of the heat agent flow through stationary layers of the wet and dry peat has been investigated. At the basis of summarizing the experimental results, the equation for the pressure loss determination in the stationary layer of the peat during the filtration of the heat agent has been obtained. The deduced equation has practical implementation at the equipment design stage for peat drying and allows to calculate theoretically the pressure loss in the layers of the peat under the similar hydrodynamic conditions and within the material layers heights from  $20 \cdot 10^{-3}$  m up to  $50 \cdot 10^{-3}$  m.

**Key words:** peat, air dryers, filtration method of drying, porous structure, hydrodynamics, heat agent flow, pressure loss in the stationary layer, hydrodynamic conditions.

**Постановка проблеми.** В умовах зростання цін на газ і вугілля використання фрезерного торфу як енергоресурсу є перспективним для України, беручи до уваги значні поклади останнього [1, 2]. Згідно з “Концепцією розвитку торф’яної промисловості України до 2030 року”, видобуток торфу для палива та добрив в Україні у 2020 році заплановано в обсязі 4–5 млн тонн на рік [3]. Фрезерний торф може бути цінним місцевим видом палива для теплоелектростанцій, комунальних господарств, вихідною сировиною для виробництва паливних брикетів, обсяг якого має досягти 1,0 млн тонн на рік у 2030 році [3]. Процеси виготовлення пресованого палива на основі торфу є багатостадійними, тривалими, ресурсо- та енергозатратними [4]. Збільшення обсягів виробництва

торфобрикетів повинно супроводжуватись вирішенням завдання щодо зниження питомих енерговитрат на виробництво останніх.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні витрати енергії для виробництва торфобрикетів пов'язані з сушінням торфу у заводських умовах і становлять близько 80 % загальних енерговитрат [5]. Велика енергозатратність процесів сушіння торфу пояснюється насамперед значною вологістю останнього, яку необхідно знизити до 6–12 % для реалізації процесу ущільнення з отриманням брикетів високої якості.

Основним методом сушіння торфу є конвективний, реалізують який переважно за допомогою пневмогазових сушильних установок, які відрізняються своєю конструктивною різноманітністю [6]. На реалізацію процесу сушіння у пневмосушарках затрачають приблизно 50 % сухої маси торфу, яка пройшла стадію зневоднення, тобто енергозатрати є значними і пов'язані насамперед з необхідністю транспортування значних кількостей високотемпературного теплового агенту. Однак потенціал останнього використовують не повністю, тому на виході з пневмосушарки відпрацьований сушильний агент характеризується високими температурами (70–130 °С), що вказує на значні втрати теплової енергії. Разом із тепловим агентом із зони сушіння виноситься дрібнодисперсна фракція продукту, що, з одного боку, приводить до втрати продукції, з іншого – до забруднення довкілля, тому зумовлює необхідність встановлення пилоочисної апаратури. Основним недоліком використання цих сушарок є низька якість одержуваного сухого продукту, що проявляється у значній вологорізниці класів крупності частинок матеріалу [7], що, безумовно, спричиняє неефективність подальшого процесу брикетування торфу з отриманням брикетів низької якості.

З метою покращання якості сушіння торфу апаратурно-технологічне оформлення пневмотрубсушарок постійно удосконалюють, вводячи рециркуляцію газу та продукту, сепарацію та подрібнення висушуваного матеріалу, розширюючи межі їх використання. Поєднання процесів розмелювання та зневоднення у сушарках з мелючим вентилятором та шахтним млином сприяє інтенсифікації тепло- і масообміну процесів сушіння, тобто дає змогу зменшити вологорізницю частинок від 8–10 до 2–2,5 % [7]. Пневмосепараційні сушарки забезпечують розділення фракцій торфу за крупністю, забезпечуючи досушування частинок більших розмірів. Однак, встановлення додаткового обладнання до сушильних установок ускладнює конструкцію останніх, робить їх великогабаритними та більш енергозатратними.

Тому важливим завданням сьогодення є розроблення обладнання для реалізації нових ефективних методів сушіння торфу, які б дали змогу зменшити питомі енергетичні затрати на процес, зменшити втрати продукту та вирішити екологічні проблеми, пов'язані з викидами високотемпературного теплового агенту та твердої фази. Вирішення поставленого завдання дасть змогу підвищити ефективність функціонування торфобрикетних заводів та зробити продукцію українського виробника конкурентоспроможною на зовнішньому ринку.

Відомо, що фільтраційне сушіння, яке реалізують профільтруванням теплового агента крізь пористу структуру шару матеріалу, що розміщується на перфорованій перегородці, є одним з високоінтенсивних методів зневоднення дисперсних матеріалів [8–10]. У процесі сушіння торфу як капілярно-пористого колоїдного матеріалу тепловий агент контактує з величезною внутрішньою поверхнею всіх пор і капілярів, що утворює поверхню тепло- та масообміну, забезпечуючи достатньо високі значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі. Фільтраційне сушіння дає змогу знизити питомі затрати теплоти й електроенергії на реалізацію процесу завдяки необхідності транспортування значно менших обсягів теплового агента порівняно з пневмосушінням, а також можливості використання останнього з низьким температурним потенціалом 60–120 °С. Сушіння торфу фільтраційним методом є екологічно безпечним завдяки утворенню “фільтрувальної перегородки”, в якій дрібніші частинки затримуються між частинками більших фракцій.

На етапі проектування установок фільтраційного сушіння важливою є наявність відомостей щодо значення втрат тиску в шарі матеріалу, що є необхідним для прогнозування енергозатрат на реалізацію процесу та підбір обладнання, яке забезпечуватиме транспортування теплового агенту.

Значення втрат тиску  $\Delta P$  у стаціонарному шарі дисперсного матеріалу, характеристиками якого є еквівалентний діаметр  $d_e$  та еквівалентна довжина каналів  $H_e$ , під час профільювання крізь нього теплового агента густиною  $\rho$  зі швидкістю  $\omega$  можна розрахувати за залежністю Дарсі–Вейсбаха [11]:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}. \quad (1)$$

Використання цієї залежності ускладнюється необхідністю визначення коефіцієнта опору шару  $\lambda$  для кожного конкретного матеріалу і який у загальному вигляді можна подати як функцію числа Рейнольдса [12]:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (2)$$

де “А” та “В” – невідомі коефіцієнти, які визначають експериментальним шляхом.

За відомих значень критерію Ейлера  $Eu$  та критерію Рейнольдса  $Re$  розрахувати значення втрат тиску в шарі дисперсного матеріалу, крізь який профільюють тепловий агент можна використовуючи степеневу функцію [11]:

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \left( \frac{H_e}{d_e} \right)^y. \quad (3)$$

Значення коефіцієнта “А” і показників степеней “х” і “у” функції (3) для кожного конкретного матеріалу та за певних режимів фільтрування газового потоку відрізняються, тому їх знаходять узагальненням результатів експериментальних досліджень.

На основі аналізу джерел літератури можна зробити висновок, що залежностей для визначення втрат тиску в шарі торфу під час профільювання крізь нього теплового агента не існує.

**Мета роботи** – дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний пористий шар торфу різної висоти для отримання розрахункової залежності, яка дала б змогу розрахувати значення втрат тиску в шарі матеріалу та стала б основою розроблення науково обґрунтованих режимів сушіння у сушарці фільтраційного типу.

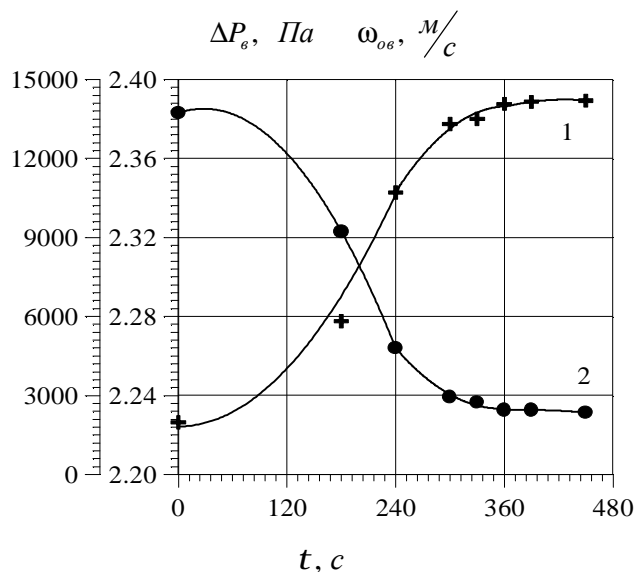
**Виклад основного матеріалу і обговорення результатів.** Для досліджень було використано фрезерний торф, попередньо підсушений в умовах навколишнього середовища до вологовмісту 3,4 кг/кг та подрібнений. Досліджували гідродинаміку під час руху теплового агента крізь шари вологого та сухого торфу заввишки  $50 \cdot 10^{-3}$ ;  $40 \cdot 10^{-3}$ ;  $30 \cdot 10^{-3}$  та  $20 \cdot 10^{-3}$  м на дослідній установці та за методиками, наведеними у [10].

Оскільки торф є капілярно-пористим колоїдним матеріалом, то за вказаного вологовмісту волога міститься як у середині частинок матеріалу, так і у вільному об’ємі шару матеріалу. В процесі фільтраційного сушіння з торфу виділяється насамперед волога, яка заповнює вільний об’єм матеріалу, а вже пізніше розпочинається виділення вологи, яка міститься в частинках. Отже, сумарний переріз мережі капілярів шару торфу, заповненої вологою, в процесі сушіння безперервно змінюється, що впливає на характер руху теплового агента, зміну опору матеріалу. Зважаючи на вищесказане, очевидним є те, що опір шару вологого торфу під час профільювання крізь нього теплового агента буде вищим порівняно з опором шару сухого торфу. Зважаючи на зональний характер фільтраційного сушіння, коли в шарі міститься одночасно як вологий, так і сухий матеріал, ширина зони якого зростає в ході процесу, доцільним є проведення досліджень гідродинаміки як вологого, так і сухого шарів торфу.

Результати досліджень гідродинаміки під час руху теплового агента крізь шари вологого торфу зображено на рис. 1 та 2. На рис. 1 на прикладі висоти шару торфу  $20 \cdot 10^{-3}$  м наведено залежності зміни в часі величини втрат тиску в шарі торфу  $\Delta P_B = f(\tau)$  та фіктивної швидкості руху теплового агента крізь шар матеріалу  $\omega_{0B} = f(\tau)$ .

Як видно з рис. 1, на початку процесу профільтрування теплового агента крізь шар торфу його вологовміст та гідравлічний опір максимальні, а фільтраційна здатність – мінімальна. Зважаючи на високий початковий вологовміст торфу і на те, що значна кількість води в ньому втримується механічно, вона легко видаляється завдяки механічному витісненню і винесенню води без її фазового перетворення, що зменшує енергозатрати на процес сушіння.

Рис. 1. Гідродинаміка під час руху теплового агента крізь шар вологого торфу заввишки  $20 \cdot 10^{-3}$  м: крива 1 –  $w_{0B} = f(t)$ ; крива 2 –  $\Delta P_B = f(t)$ . Сталій параметр:  $T = 323$  К



Надалі опір шару матеріалу зменшується завдяки виділенню фізико-механічно втримуваної води з поверхні частинок, а також із самих частинок матеріалу. Тобто, фіктивна швидкість руху теплового агента крізь шар матеріалу зростає.

Графічні залежності  $\Delta P_B = f(w_{0B})$ , зображені на рис. 2, доповнюють зміст попередньо сказаного, ілюструючи взаємозв'язок між втратами тиску в шарах торфу різної висоти та фіктивною швидкістю руху теплового агента.

Значне зростання втрат тиску в шарах вологого торфу із збільшенням висоти останнього необхідно враховувати під час вибору науково обґрунтованих параметрів проведення процесу фільтраційного сушіння торфу. Так, для висоти шару торфу  $50 \cdot 10^{-3}$  м (залежність 1) початкове значення втрат тиску в матеріалі становить 23000 Па за швидкості руху теплового агента 1,54 м/с, а в кінці процесу втрати тиску становлять 2000 Па за швидкості руху теплового агента 1,82 м/с; для висоти шару  $20 \cdot 10^{-3}$  м (залежність 4) початкове значення втрат тиску в матеріалі становить 14000 Па за швидкості руху теплового агента 2,28 м/с, а в кінці процесу втрати тиску становлять 2000 Па за швидкості руху теплового агента 2,42 м/с. Зображені на рис. 2 графічні залежності можна практично використати, оскільки вони дають змогу прогнозувати енергозатрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння торфу в межах досліджених висот шару матеріалу та правильно підібрати обладнання для транспортування теплового агента.

На рис. 3 зображено графічні залежності зміни втрат тиску в шарах сухого торфу за зміни фіктивної швидкості руху теплового агента, а саме:  $\Delta P_C = f(w_{0C})$ .

З рис. 3 видно, що для кожної висоти шару сухого торфу із збільшенням фіктивної швидкості руху теплового агента крізь шар матеріалу значення втрат тиску в шарах зростають. Однак, значення втрат тиску в шарах сухого торфу є значно меншими, ніж у шарах вологого торфу аналогічної висоти.

На основі узагальнення результатів досліджень гідродинаміки профільтрування теплового агента крізь вологі та сухі шари торфу отримано залежність, яка дає змогу розрахувати втрати тиску в шарах торфу, що містять одночасно як вже сухий, так і ще вологий матеріал у межах досліджуваних висот останніх в процесі фільтраційного сушіння останнього, коли в шарі міститься як вологий, так і сухий матеріал:

$$\Delta P_m = 345 \cdot H \cdot \omega_{oc} + 17330 \cdot H \cdot \omega_{oc}^2 + 6,76 \cdot H^{1,36} \cdot (\omega_{oc} - \omega_{oe}). \quad (4)$$

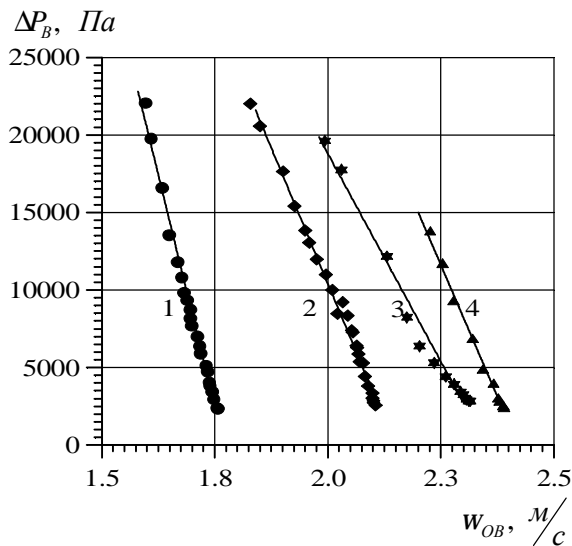


Рис. 2. Взаємозв'язок між втратами тиску в шарах вологого торфу заввишки: 1 –  $50 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $40 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $30 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $20 \cdot 10^{-3}$  м та фіктивною швидкістю руху теплового агента. Сталий параметр:  $T = 323$  К

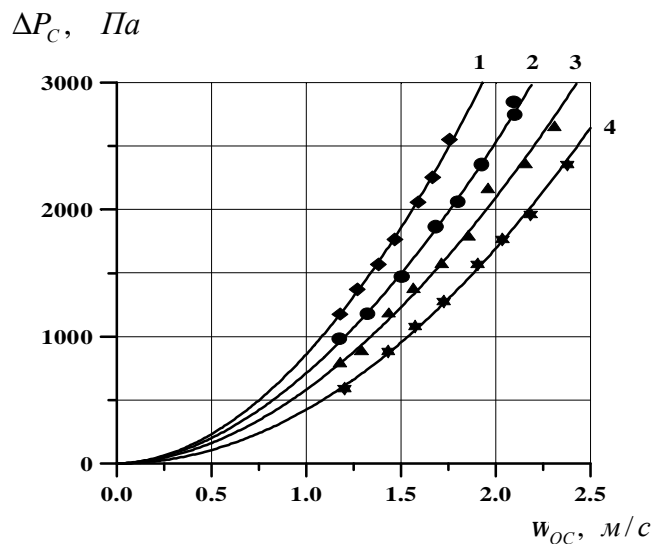


Рис. 3. Взаємозв'язок між втратами тиску в шарах сухого торфу заввишки: 1 –  $50 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $40 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $30 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $20 \cdot 10^{-3}$  м і швидкістю руху теплового агента. Сталий параметр:  $T = 323$  К

Залежність (4) є справедливою в межах досліджуваних висот шарів торфу і має практичне використання, оскільки є корисною на етапі проектування сушильного обладнання фільтраційного типу для торфу.

**Висновок.** На основі узагальнення експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарні шари вологого та сухого торфу різної висоти отримано розрахункову залежність (4), яка дає змогу прогнозувати втрати тиску під час фільтраційного сушіння торфу, яку зручно використовувати на стадії проектування сушильного обладнання за подібних гідродинамічних умов у межах досліджуваних висот шарів матеріалу.

1. Снежкін Ю. Ф. Розробка енергоефективного палива на торф'яній основі / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, Л. Й. Воробйов, О. О. Хавін // *Промышленная теплотехника*. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 41–46.
2. Гнеушев В. О. Торфове паливо: Міфи та реалії // *Енергозбереження Полісся*. – 2001. – № 2.
3. Концепція розвитку торф'яної промисловості України до 2030 року. Міністерство вугільної промисловості України. Український концерн торф'яної промисловості “Укрторф”. – К., 2006. – 54 с.
4. Лазарев А. В., Лыкин Б. Г., Демьянов Е. С. и др. *Технология производства торфяных брикетов*. – М.: Недра, 1984, 264 с.
5. Кулаковський Л. Я. Підвищення енергоефективності енерготехнологічного комплексу сушіння на торфобрикетному виробництві: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – К., 2017.
6. Kulakovskiy L. *Optimal Operation of the Peat Drying Process in Steam Tube Dryers* / Leonid Kulakovskiy, Victor Rosen, Roshan Sharma, Carlos Pfeiffer, Bernt Lie // *Linkoping University Press*. – 2015. – Р. 31–41.
7. Гнеушев В. О. *Брикетування торфу: монографія*. – Рівне, 2010, 185 с.
8. Nosovkyi R., Kindzera D., Atamanuk V. *Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks*. *Chemistry and Chemical Technology*. Lviv Polytechnic National University. Volume 10, Number 4, 2016. P. 459–463.
9. Атаманюк В. М. *Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: дис.я д-а техн. наук*. – Львів; 2007.
10. Мосюк М. І. Фільтраційне сушіння “енергетичної” верби / М. І. Мосюк, В. М. Атаманюк, Д. П. Кіндзера // III міжнародний молодіжний фестиваль наук. “Хімія та хімічні технології”. Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених (ССТ – 2011). Україна. Львів. – 2011. – С. 204–205.
11. Атаманюк, В. М. *Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [Текст]: монографія* / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.
12. Атаманюк В. М., Кіндзера Д. П., Госовський Р. Р. Розрахунок коефіцієнта гідравлічного опору під час руху теплового агента крізь стаціонарний шар подрібнених стебел соняшника // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2012. – Вип. 22.9. – С. 112–118.