

Експериментальні дослідження проводились з форсунками діаметрами 6 і 8 мм на воді та пульпі різної консистенції. Аналіз результатів дослідів вказав на те, що розхід пульпи на форсунках пропорційний їх перерізу і не залежить від її консистенції, тобто $Q = k_1 F$, де k_1 – коефіцієнт питомих втрат.

При $F = (25 \dots 105) \text{ мм}^2$ залежність $Q=f(F)$ лінійна, а при $F > 105 \text{ мм}^2$ вона переходить в область квадратичної залежності [2].

Підставивши вирази для розрахунків V і μ у формулу (8), остаточно отриманий вираз для визначення ефективної продуктивності гідроабразивної обробки зовнішньої циліндричної поверхні залізничних цистерн:

$$G = 82,213 \cdot \frac{\beta_0}{\beta_0 + 1} \cdot \frac{V_n^3}{(dc^2 \cdot t)^2} \cdot c \cdot k_\alpha \cdot k_z \cdot \gamma_a. \quad (9)$$

Експериментально встановлено числове значення коефіцієнта c , який за даних умов роботи для обробки сталюї поверхні дорівнює $c = 0,846 \cdot 10^{-3} \text{ г/Н м}$.

Література

1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1989. – 177 с.
2. Билик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1960. – 198 с.

УДК 66.045

*Аспір. Д.П Кіндзера; проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук;
доц. В.М. Атаманюк, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"*

ГІДРОДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРИ СУШІННІ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ

Представлено експериментальні і теоретичні дослідження гідродинаміки фільтрування теплоносія крізь вологий шар торфу при фільтраційному сушінні.

*Doctorate D. Kidzera, prof. Ya. Khanyk,
doc. V. Atamanuk – NU "Lvivs'ska Politehnika"*

The hydrodynamic peculiarities of drying disperse materials in the dense layer

In this work are represented experimental and theoretical investigations of the hydrodynamics of hot air filtration through the wet layer of the peat during filtration drying.

У західних регіонах України сконцентровані значні запаси торфу, теплота згорання якого є достатньо високою і становить 18900-27300 кДж/кг. У зв'язку з цим є актуальною проблема застосування торфу, як палива, у народному господарстві. Це дозволить частково розв'язати енергетичну проблему України та зменшити її залежність від країн експортерів енергоносіїв.

Постановка проблеми. Для використання торфу я паливо його необхідно попередньо висушити до вологості 10-12 % і спресувати у так звані торфобрикети. З усіх відомих методів сушіння найбільш екологічно чистим і

найбільш ефективним є фільтраційне сушіння, кінетика якого великою мірою визначатиметься гідродинамікою фільтрації теплоносія крізь шар вологого матеріалу. Тому є дуже важливим встановити характер зміни фільтрації теплоносія протягом процесу сушіння, як і його вплив на кінетику з метою прогнозування енергетичних затрат та визначення оптимальних технологічних параметрів процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження впливу гідродинаміки фільтрування теплоносія на гідравлічний опір шару зернистого матеріалу представлений у наступних роботах [1-4], у яких автори досліджують гідродинамічний опір сухого шару дисперсного матеріалу. Однак у вище вказаних роботах відсутні дослідження вологого матеріалу, зокрема торфу, а також відсутні розрахункові залежності, які б дозволили прогнозувати зміну гідравлічного опору вологого матеріалу у процесі сушіння.

Мета досліджень. Мета даної роботи – на основі експериментальних досліджень встановити розрахункові залежності, які б дозволили прогнозувати зміну гідравлічного опору шару вологого торфу у процесі фільтраційного сушіння.

Нами досліджувалась динаміка зміни втрат тиску і швидкості фільтрування теплоносія у шарі торфу висотою $20 \cdot 10^{-3}$; $30 \cdot 10^{-3}$; $40 \cdot 10^{-3}$; $50 \cdot 10^{-3}$ м.

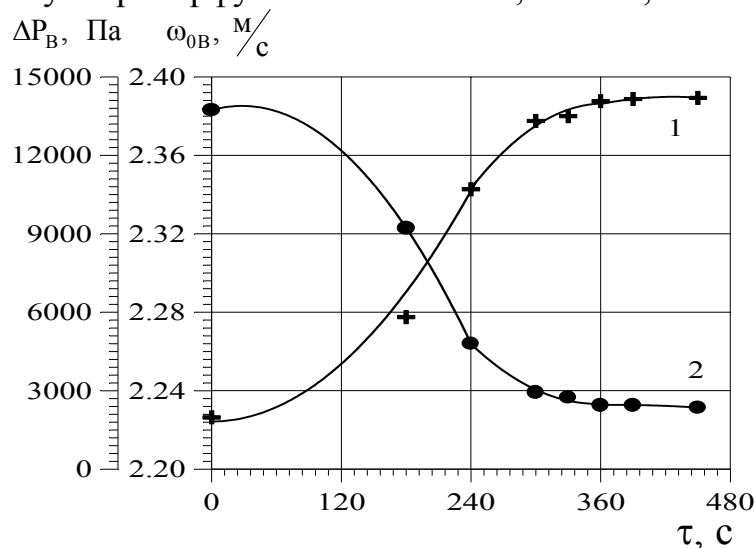


Рис. 1. Залежність втрат тиску (крива 2) та фіктивної швидкості фільтрування теплоносія (крива 1) від часу в процесі фільтраційного сушіння шару торфу висотою $20 \cdot 10^{-3}$ м. $T=323$ К

Як видно з рис. 1, протягом перших 60 с втрати тиску у шарі вологого торфу залишаються практично без змін і становлять близько 13650 Па. В цей період видаляється поверхнева волога із наскрізних капілярів, через які фільтрується теплоносій, вільний об'єм шару при цьому, змінюється незначно. Починаючи з 60-ї с процесу, за рахунок зменшення вологості матеріалу, починає зростати кількість наскрізних проникних для теплоносія каналів, появляється і весь час зростає шар сухого матеріалу (із сторони контакту матеріалу з теплоносієм з найвищим сушильним потенціалом), що приводить до збільшення вільного об'єму шару, внаслідок чого, і до різкого зменшення втрат тиску та збільшення швидкості фільтрування теплоносія. Цей період

триває до закінчення видалення вологи із капілярів, які можуть бути газопроникними для теплоносія, і до досягнення матеріалом критичної вологості. Втрати тиску при цьому зменшуються від 13650 Па до 2400 Па (приблизно у 5,7 рази), а фіктивна швидкість фільтрації теплоносія за цей час зростає від 2,23 с до 2,39 с (всього в 1,07 раз). Починаючи з 360-ї с волога видаляється конвективно за рахунок молекулярної дифузії води із ядра частинок до газопроникних капілярів. Кількість газопроникних капілярів при цьому залишається постійною, тому втрати тиску і швидкість фільтрування теплоносія також залишаються незмінними. Цей період триває приблизно 90 с до досягнення матеріалом кінцевої вологості.

Збільшення висоти шару торфу приведе до збільшення втрат тиску (при постійному перепаді тисків на сухому матеріалі) і зменшення швидкості фільтрування теплоносія на початку і в кінці процесу сушіння, що звичайно призведе до зростання часу досягнення критичної і кінцевої вологості. Це пояснюється зменшенням інтенсивності підведення тепла до вологого матеріалу за рахунок зменшення швидкості фільтрування теплоносія.

На рис. 2 представлені результати експериментальних досліджень гідродинаміки фільтрації теплоносія крізь шар торфу висотою $30 \cdot 10^{-3}$ м.

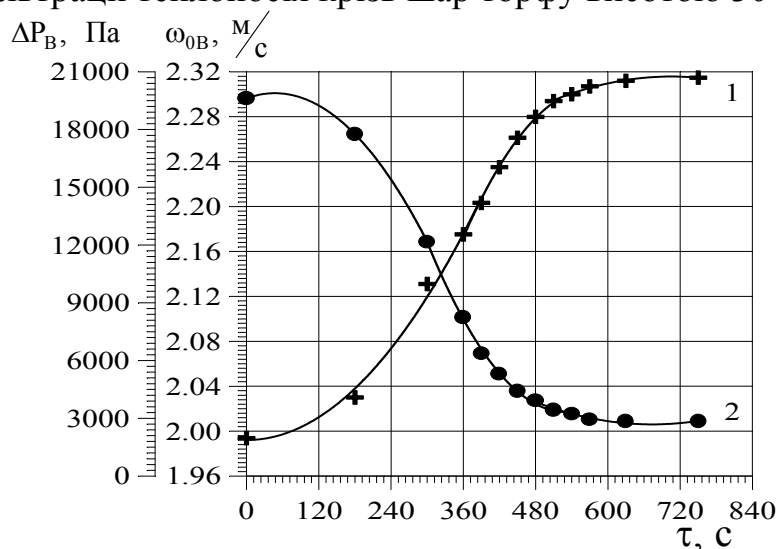


Рис. 2. Залежність втрат тиску (крива 2) та фіктивної швидкості фільтрування теплоносія (крива 1) від часу в процесі фільтраційного сушіння шару торфу висотою $30 \cdot 10^{-3}$ м. $T=323$ К

Як видно з рис. 2 характер зміни втрат тиску і швидкості фільтрування є подібними з попереднім графічним зображенням і збільшення висоти вологого торфу у 1,5 рази призвело до зменшення швидкості фільтрування теплоносія на початку процесу сушіння з $\omega_{ог} = 2,23$ м/с до $\omega_{ог} = 1,9$ м/с (приблизно у 1,17 раз) і кінці процесу сушіння з $\omega_{ог} = 2,39$ м/с до $\omega_{ог} = 2,32$ м/с (приблизно у 1,03 рази) це призвело до зростання часу сушіння з 450 с до 750 с приблизно в 1,7 рази.

Для порівняння наведемо результати експериментальних досліджень шару вологого торфу висотою $40 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 3) і $50 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 4).

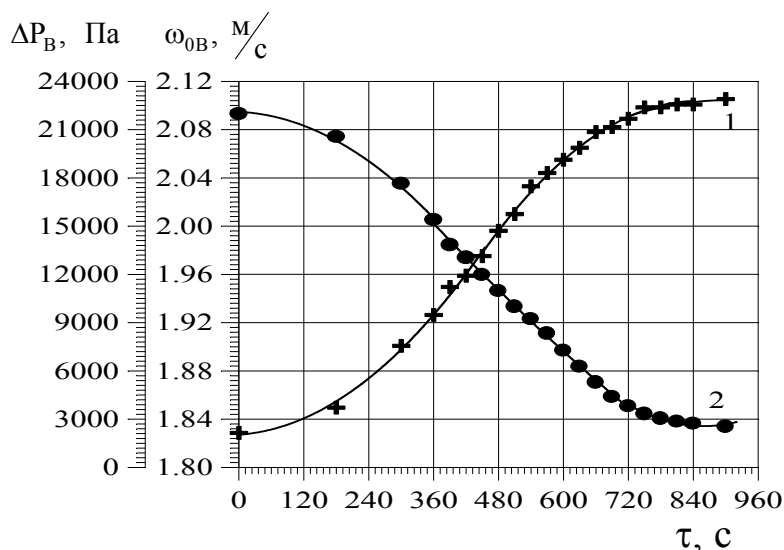


Рис. 3. Залежність втрат тиску (крива 2) та фіктивної швидкості фільтрування теплоносія (крива 1) від часу в процесі сушіння шару торфу висотою $40 \cdot 10^3$ м. $T=323$ К

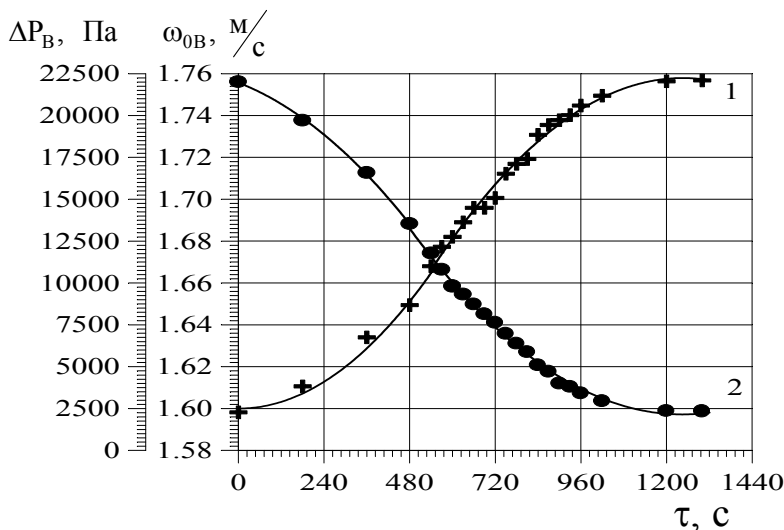


Рис. 4. Залежність втрат тиску (крива 2) та фіктивної швидкості фільтрування теплоносія (крива 1) від часу в процесі фільтраційного сушіння шару торфу висотою $50 \cdot 10^3$ м. $T=323$ К

Як видно з рис. 3-4 графічні залежності є подібними, швидкість фільтрування продовжує зменшуватися, а втрати тиску і час досягнення кінцевої вологості зростають. Результати порівнянь представимо у табл. 1.

Табл. 1. Результати порівнянь

$H, \text{ м}$	$\Delta P_{\text{в.поч.}}, \text{ Па}$	Зростає порівняно з $H=0,02 \text{ м}$	$\Delta P_{\text{в.кінц.}}, \text{ Па}$	$\omega_{\text{об поч.}}, \text{ м/с}$	Зменшується порівняно з $H=0,02 \text{ м}$	$\omega_{\text{об кінц.}}, \text{ м/с}$	Зменшується порівняно з $H=0,02 \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	Зростає порівняно з $H=0,02 \text{ м}$
0,02	13650	1	2400	2,23	1	2,39	1	450	1
0,03	19500	1,43	2400	1,99	1,12	2,32	1,03	750	1,7
0,04	22000	1,61	2400	1,83	1,22	2,10	1,14	900	2,0
0,05	22500	1,65	2400	1,60	1,39	1,77	1,35	1300	2,89

Як видно із даних табл. 1 зростання висоти шару торфу приводить до зростання втрат тиску на початку процесу сушіння і зменшення швидкості фільтрування теплоносія, як на початку, так і в кінці процесу, і, як наслідок, зростання часу досягнення кінцевої вологості. Втрати тиску і швидкість руху теплоносія крізь шар торфу у процесі фільтраційного сушіння змінюються (втрати тиску зменшуються а швидкість фільтрування зростає), тому важливо є встановити закономірність цих змін з метою прогнозування процесу сушіння. Для цього представимо залежність втрат тиску від зміни швидкості фільтрування теплоносія у процесі фільтраційного сушіння на рис. 5.

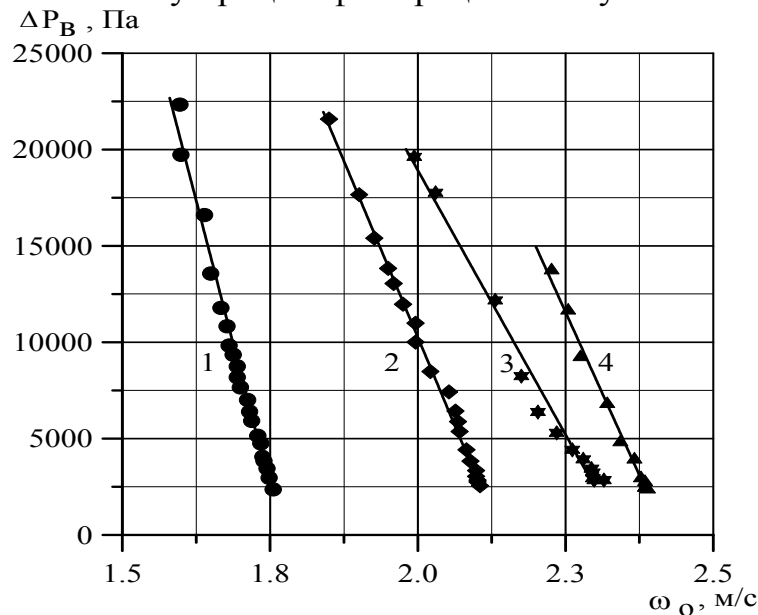


Рис. 5. Залежність втрат тиску у шарі вологого торфу від фіктивної швидкості фільтрування теплоносія. $T=323\text{ K}$.

Товщина шару: 1 – $50 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 2 – $40 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 3 – $30 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 4 – $20 \cdot 10^{-3}\text{ м}$.

Як видно із рис. 5 зміна втрати тиску від фіктивної швидкості руху теплоносія крізь шар вологого торфу може бути представлена у вигляді лінійної залежності. Величина втрат тиску (при рівній початковій вологості) на початку сушіння залежить від висоти вологого шару і втрат тиску встановленого на сухому матеріалі. Кут нахилу прямих до осі ординат буде визначатися кінетикою процесу фільтраційного сушіння, тобто інтенсивністю підведення теплоти до шару матеріалу. Як видно із таблиці 1 та рис. 5, інтенсивність сушіння буде найбільшою у шарі вологого торфу висотою $20 \cdot 10^{-3}\text{ м}$, тому кут нахилу прямої 4 до осі ординат є найменшим. Тобто, при однакових початкових умовах (вологості і температурі теплоносія) кут нахилу прямих до осі ординат буде залежати від висоти шару і швидкості фільтрування теплоносія встановленого по сухому матеріалові. Тому, для узагальнення експериментальних залежностей приведених на рис. 5 їх необхідно доповнити залежностями перепаду тисків у шарі сухого торфу при штучному зменшенні швидкості фільтрування теплоносія від ω_0 до 0.

На рис. 6 представлена гідродинаміка фільтрування теплоносія крізь сухий та вологий шар матеріалу.

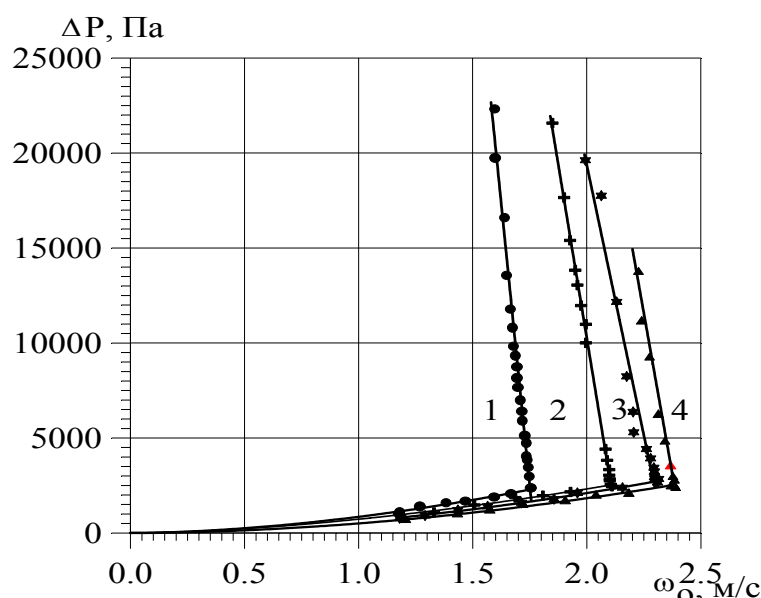


Рис. 6. Залежність втрат тиску у сухому та вологому шарі торфу від фіктивної швидкості фільтрування теплоносія. $T=323\text{ K}$.

Товщина шару: 1 – $50 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 2 – $40 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 3 – $30 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; 4 – $20 \cdot 10^{-3}\text{ м}$.

Як видно із рис. 6 гідродинаміка вологого і сухого шару торфу суттєво відрізняються між собою. Гідродинаміка сухого зернистого матеріалу описується рівнянням Дарсі-Вейсбаха. Зростання швидкості фільтрування теплоносія в цьому випадку приводить до відповідного зростання втрат тиску, що і підтверджується експериментальними даними [3]. У процесі фільтраційного сушіння (волога гідродинаміка) спостерігаємо іншу залежність (рис. 4 і рис. 5). Втрати тиску у процесі сушіння зменшуються, а швидкість фільтрування теплоносія при цьому зростає. Це пояснюється механізмом фільтраційного сушіння. На початку процесу теплоносієм фільтрується через окремі газопроникні капіляри не заповнені водою, тому опір шару є великим а швидкість руху теплоносія є мінімальною. У міру висихання матеріалу, доля води у шарі, буде зменшуватися, а кількість газопроникних капілярів і вільний об'єм будуть зростати, що приведе до зменшення втрат тиску та одночасному збільшенню швидкості руху теплоносія, так буде продовжуватися до досягнення втрат тиску встановлених на сухому матеріалі. Тобто, на основі сказаного вище можна записати, що втрати тиску у шарі матеріалу залежать від:

$$\Delta P = f(\Delta P_c, H, \omega_{oc}, \omega_{og})$$

або

$$\Delta P = \Delta P_c + \Psi(H, \omega_{oc}, \omega_{og}), \quad (1)$$

причому втрати тиску у шарі торфу будуть описуватися двома рівняннями для сухого шару рівнянням отриманим на основі рівняння Дарсі-Вейсбаха [1], для вологого – рівнянням прямої, яку можна представити у вигляді:

$$\Delta P_g = C - D \cdot \omega_o, \quad (2)$$

де: C – максимальний гідравлічний опір вологого матеріалу у початковий момент часу, коли швидкість фільтрування є найменшою; D – коефіцієнт, який залежить від висоти шару та інтенсивності процесу сушіння.

Представимо коефіцієнти C і D рівняння (2) для всіх висот шару вологого торфу у вигляді табл. 2.

Табл. 2. Коефіцієнти C і D рівняння (2) для всіх висот шару вологого торфу

$H, \text{ м}$	C	D
0,02	142258	60273
0,03	142966	61033
0,04	156446	73094
0,05	222386	125787

Значення коефіцієнтів C і D зростає із зростанням висоти шару матеріалу і легко переконатися у тому, що ця залежність носить степеневий характер. Тоді рівняння (1) можна представити у вигляді:

$$\Delta P = \Delta P_c + K \cdot H^n \cdot (\omega_{oc} - \omega_{ov}), \quad (3)$$

де: K і n – коефіцієнти, які визначаються експериментально; ω_{oc} , ω_{ov} – відповідно фіктивна швидкість теплоносія встановлена по сухому матеріалові і біжуча фіктивна швидкість у вологому матеріалі, м/с; ΔP_c – втрати тиску у шарі сухого торфу, які визначаються згідно [3] за формулою:

$$\Delta P_c = 345 \cdot H \cdot \omega_{oc} + 17330 \cdot H \cdot \omega_{oc}^2. \quad (4)$$

Із врахуванням значень табл. 2 рівняння (3) можна представити у вигляді:

$$\Delta P = \Delta P_c + 6,76 \cdot H^{1,36} \cdot (\omega_{oc} - \omega_{ov}) \quad (5)$$

або з урахуванням рівняння (4)

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

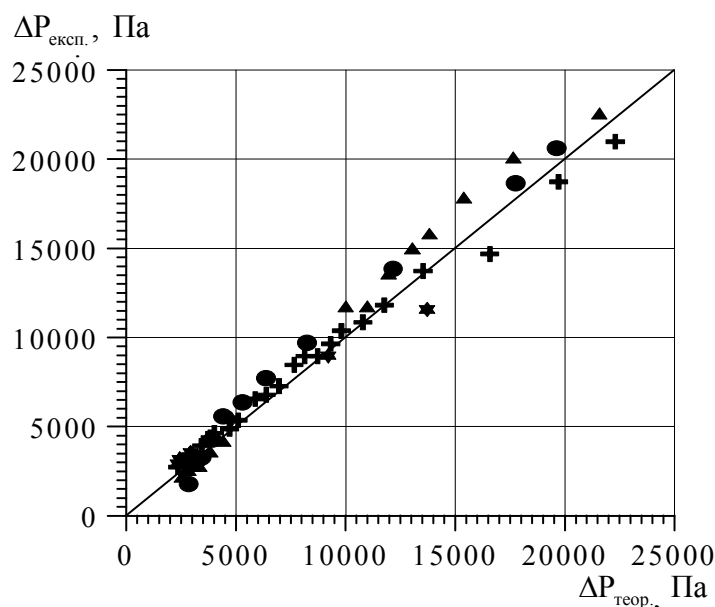


Рис. 7. Кореляційна залежність між значеннями втрат тиску розрахованими теоретично $\Delta P_{теор.}$ та експериментальними значеннями $\Delta P_{експ.}$, Па

Отримане рівняння (6) дає можливість розрахувати втрати тиску у шарі вологого торфу під час його сушіння при відомих значеннях вихідних па-

раметрів ΔP_c , ω_{oc} і працює в інтервалі зміни швидкості $\omega_{ov} \div \omega_{oc}$. На рис. 7 представлена кореляційна залежність між експериментальними та розрахованими за рівнянням (6) значеннями.

Висновок. На основі експериментальних даних отримана розрахункова залежність (6), яка дозволяє розрахувати гідравлічний опір як вологого так і сухого шару торфу. Як видно із рис. 7 максимальна відносна похибка між експериментальними та теоретично розрахованими значеннями за рівнянням (6) не перевищує 12 відсотків, що є прийнятним для практичного використання цього рівняння при розрахунку сушильного обладнання.

Література

1. Дулеба В.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка під час руху повітря через шар сухого зернистого поліакриламиду. Ж. Хімічна промисловість України. №2, 1997. – С. 16-19.
2. Гузьова І.О., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння кавової сировини для екстрагування жиру. Ж. Хімічна промисловість України. №5, 2001. – С. 44-46.
3. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння торфу. Вісник НУ "Львівська політехніка", Хімія, технологія речовин та їх застосування. №426, 2001. – С. 204-208.
4. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару. Ж. Хімічна промисловість України. №6, 2002. – С. 38-42.

УДК 647.047

Аспір. А.І. Мацьків* – УкрДЛТУ

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Наводяться результати аналізу залежностей коефіцієнта внутрішнього вологоперенесення та основних гігроскопічних характеристик деревини дуба, розглянуто можливість їх використання в математичних моделях процесів сушіння.

Doctorate A.I. Matskiv – USUFWT

Analysis of main coefficients in wood drying modelling

In article presented equations for assessment of diffusion coefficients and main hygroscopic properties of oak specimens, the possibilities of use its in wood drying modeling are highlighted.

Сонячне сушіння деревини як складний тепломасообмінний процес характеризується мінливістю режимних параметрів, які залежать від кліматичних і погодних умов. Така складність процесу зумовлює потребу у дослідженні процесів сонячного сушіння на математичних моделях. Вивчення процесів сушіння шляхом моделювання зводиться до розв'язку диференціальних рівнянь в часткових похідних, які з певним рівнем адекватності розкривають механізм внутрішнього вологоперенесення. Зростаюча потужність комп'ютерної техніки дозволяє отримати числові розв'язки, однак достовірність результатів моделювання, в основному, залежить від адекватності мате-

* Наук. керівник: доц. І.М. Озарків, канд. техн. наук – УкрДЛТУ