

$$c_1 = m_1 \left(\frac{\omega}{z} \right)^2 \cdot \frac{-c_0 c_2 + c_0 m_3 \omega^2 + c_2 m_3 \omega^2 + c_2 m_2 \omega^2 - m_3 m_2 \omega^4}{-c_0 c_2 + c_0 m_3 \omega^2 + c_2 m_3 \omega^2 + c_2 m_1 \omega^2 - m_3 m_1 \omega^4 + c_2 m_2 \omega^2 - m_3 m_2 \omega^4}. \quad (23)$$

Формула (23) складається з двох добутоків і при умові, що в сумарних жорсткостях c_1 та c_2 резонансні налагодження z однакові, другий добуток буде дорівнювати нулю. Згідно з рекомендаціями [2], де механічна коливна система розглядається як така, що складається з двох одномасних, розрахунок сумарних жорсткостей можна виконати за спрощеними залежностями:

$$c_1 = m_{1max} \left(\frac{\omega}{z} \right)^2 \quad \text{та} \quad c_2 = m_3 \left(\frac{\omega}{z} \right)^2. \quad (24)$$

Підставляючи вирази для жорсткостей в (19), задавшись однією з амплітуд коливань, можна визначити зусилля P . Як бачимо, вирази для визначення зусилля набули значно складнішого вигляду зі збільшенням третьої коливної маси.

Висновок: Для визначення зусилля в багатомасових структурах необхідним є: складання фізичної динамічної моделі вібромашини; складання математичної моделі по фізичній динамічній моделі вібромашини; розв'язання системи диференціальних рівнянь другого порядку; аналітичне визначення амплітудних значень зусиль.

Література

1. Повидайло В.А. Расчет и конструирование вибрационных питателей. – М.: Машгиз, 1962. – 346 с.
2. Повидайло В.А. Принципы создания вибрационных устройств и машин для автоматизированных производств// Всеукраїнський наук.-техн. журнал "Вибрации в технике и технологиях". – 1994, № 1 – С. 18-27.
3. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1985. – 456 с.



Розділ III

ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

УДК 66.045

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

СУШІННЯ ПОЛІДИСПЕРСНОЇ СУМІШІ ВУГІЛЛЯ ПІСЛЯ ФЛОТАЦІЇ

Представлено експериментальні дослідження сушіння полідисперсної суміші вугілля після флотації. Подано розрахункові залежності для прогнозування процесу сушіння в першому та другому умовних періодах.

Prof. Ya.M. Khanyk, assist. D.P. Kindzera;
doc. V.M. Atamanyuk – National University "Lviv polytechnic"

Drying polydisperse coal mixtures after floatation

Present experimental researches of drying polydisperse coal mixtures after floatation. Present computation dependences for prognostication of process of drying in the first and second conditional periods.

Постановка проблеми. На території України зосереджено значні запаси вугілля, яке застосовується як сировина у хімічній промисловості та як паливо у народному господарстві. Значна частина вугілля характеризується досить низькою теплотою згорання, високим вмістом домішок, зольністю та вологістю. Для збільшення теплотворної здатності вугілля після видобування відділяють від негорючої інертної маси на збагачувальних фабриках. Після флотаційних процесів отриману полідисперсну суміш вугілля висушують в обертових сушильних барабанах, що значно підвищує собівартість готового продукту, забруднює довкілля продуктами горіння палива і дрібнодисперсною фракцією вугілля, яка утворюється внаслідок стирання частинок при співударі між собою та до стінок барабану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблем сушіння та використання низькосортного вугілля, значні запаси якого зосереджені у західних регіонах України, присвячені наукові роботи [1, 2], у яких обґрунтовується доцільність його використання та досліджується вплив окремих фракцій на кінетику сушіння. Однак практичний інтерес має сушіння не

окремих фракцій, а сушіння полідисперсної суміші, яку отримують на гірничо-збагачувальних фабриках після флотаційних процесів.

Мета досліджень. Метою даної роботи є: узагальнити результати експериментальних досліджень гідродинаміки та кінетики фільтраційного сушіння окремих фракцій і використати отримані залежності для прогнозування кінетики сушіння полідисперсної суміші вугілля, яку отримують після флотаційних процесів; зменшити енергетичні затрати на процес; скоротити тривалість сушіння (порівняно з сушінням в обертовому барабані); отримати матеріал з однаковою кінцевою вологістю; зробити процес сушіння екологічно чистим і зменшити техногенний вплив гірничо-збагачувальних фабрик на довкілля.

Вугілля, яке пройшло стадію збагачення і сушиться в промислових умовах, є сумішшю частинок $0,31 \cdot 10^{-3} \text{ м} < d < 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На рис. 1 зображена діаграма за результатами гранулометричного аналізу розмірів частинок вугілля, що утворюють полідисперсну суміш.

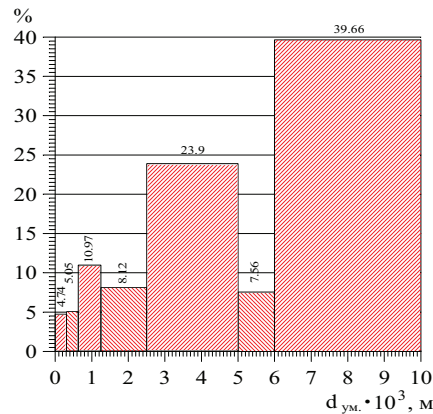


Рис. 1. Дисперсний склад збагаченого вугілля

Як видно із рис. 1, процентний вміст фракцій, діаметр яких менший ніж 1 мм становить близько 20 %, однак вплив цих фракцій на гідродинаміку, а отже і кінетику процесу є значним, що показано у роботі [3].

Проведені експериментальні дослідження закономірностей фільтрування теплоносія крізь шар полідисперсної суміші вугілля показали, що залежність втрат напору від фіктивної швидкості фільтрування також має параболічний характер, що показано на рис. 2. Встановлено, що гідравлічний опір полідисперсного шару залежить від відсоткового вмісту окремих фракцій у ньому і буде зростати зі збільшенням кількості фракцій з найменшими розмірами частин у його складі.

Для визначення гідравлічного опору шару зернистого матеріалу найчастіше застосовують залежність Дарсі-Вейсбаха, рішенням якої є модифіковане рівняння Ергана [1, 6]:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_o} = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} + B \cdot \frac{a \cdot \rho}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot \omega_o. \quad (1)$$

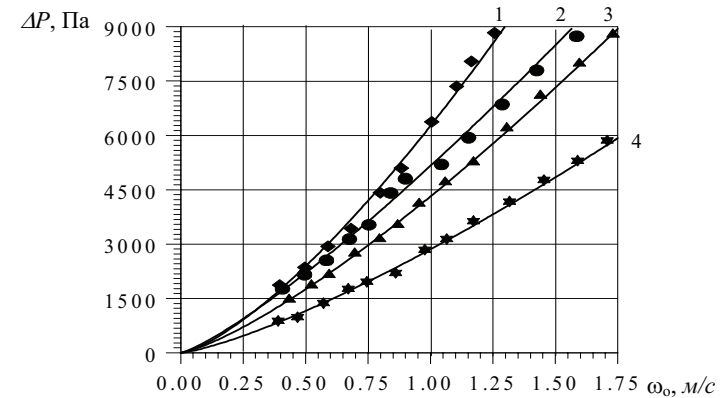


Рис. 2. Залежність гідравлічного опору полідисперсного шару вугілля від фіктивної швидкості руху теплоносія. Полідисперсна суміш, $T=318 \text{ К}$:
1 – $H=90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 2 – $H=75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 3 – $H=60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 4 – $H=45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

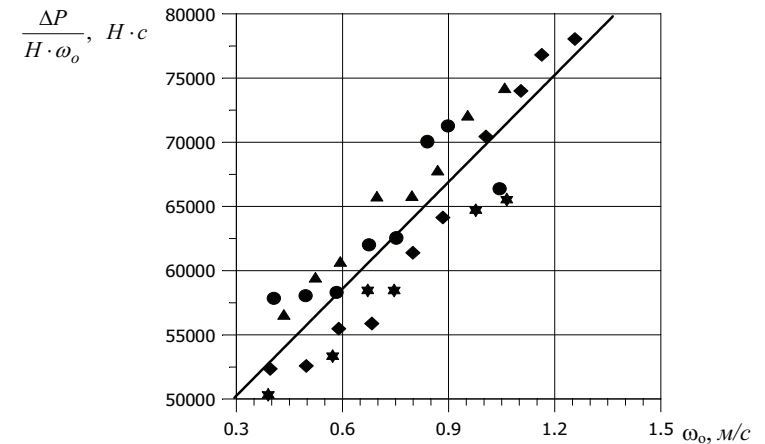


Рис. 3. Узагальнення результатів гідродинаміки полідисперсної суміші вугілля

різної висоти шару: $\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_o} = 77754 \cdot \omega_o + 41935$

Представивши експериментальні дослідження, зображені на рис. 2, у координатах $\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_o} = f(\omega_o)$ (рис. 3), можна визначити невідомі коефіцієнти A^* і B^* для полідисперсної суміші. Відрізок, який відтинає пряма лінія на осі ординат дорівнює першій складовій $A^* = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3}$ рівняння (1), а тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис дорівнює другому членові $B^* = B \cdot \frac{a \cdot \rho}{8 \cdot \varepsilon^3}$ цього рівняння. З рис. 3 визначено значення коефіцієнтів A^* і B^* та записане основне рівняння для полідисперсної суміші (2), яка характеризує втрати напору у полідисперсному шарі з відсотковим складом окремих фракцій, представлених на рис. 1.

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_o} = 77754 \cdot \omega_o + 41935 \quad (2)$$

Для окремих фракцій вугілля, що входять у склад полідисперсної суміші ми визначили [4] залежність коефіцієнтів A^* і B^* від умовного діаметра (знайдено об'ємним методом) частин вугілля ($A^* = 19,5 \cdot d_{ym}^{-1,15}$ та $B^* = 99 \cdot d_{ym}^{-0,85}$) та узагальнююче рівняння для всіх фракцій вугілля (3):

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \omega_o} = 19,5 \cdot d_{ym}^{-1,15} + 99 \cdot d_{ym}^{-0,85} \cdot \omega_o \quad (3)$$

Підстановка у це рівняння середньо зваженого діаметра полідисперсної суміші не дає змоги правильно визначити втрати напору у шарі, що пояснюється з одного боку, великою різницею між частинками (майже у 20 раз $d_{ym} = 0,45 \cdot 10^{-3}$ м і $d_{ym} = 8,7 \cdot 10^{-3}$ м), а з іншого, тим, що дрібні частинки захоплюються повітряним потоком і розташовуються між великими, ущільнюючи при цьому частину шару, й істотно збільшуючи опір полідисперсного шару. Щоби використати рівняння (3) для розрахунку втрат напору у полідисперсному шарі певного фракційного складу, ми запропонували формулу для розрахунку усередненого діаметра частин з урахуванням впливу кожної фракції на втрати напору у шарі [5]:

$$d_{усер.} = \frac{1}{100 \cdot n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot d_{ym,i} \cdot N_{\Delta P} \quad (4)$$

Енергетичні затрати при сушінні полідисперсної суміші вугілля залежать не тільки від гідродинамічних умов в пористій структурі шару, але і від його дисперсного складу. Кінетика сушіння окремих фракцій вугілля представлена у роботі [1], однак у випадку полідисперсної суміші кінетика буде мати свої особливості.

Результати дослідження сушіння у щільному шарі для різних висот шару полідисперсної суміші вугілля наведено на рис. 4.

Як видно із рис. 4, кінетичні криві для висот шару вугілля від $45 \cdot 10^{-3}$ м до $90 \cdot 10^{-3}$ м характеризуються наявністю періоду механічного витіснення та винесення вологи, під час якого вологість матеріалу зменшується від 0,192 кг/кг до 0,1 кг/кг, першим та другим умовними періодами.

Для узагальнення кінетики сушіння полідисперсної суміші в першому умовному періоді ми використали систему диференціальних рівнянь матеріального балансу та кінетики сушіння, результатом розв'язку яких є:

$$W = W_0 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot 1,4 \cdot 10^{-18} \cdot T^{5,6} \cdot \Delta P^{0,38} \cdot H^{-0,7} \cdot \tau \cdot e^{-18,94 \cdot H} \right) \quad (5)$$

Для узагальнення процесу сушіння полідисперсної суміші у другому періоді ми отримали таке рівняння:

$$W = (W_{кр.} - W_p) \cdot e^{-37,5 \cdot N \cdot \left(\tau - \frac{W_0 - W_{кр.}}{N} \right)} + W_p \quad (6)$$

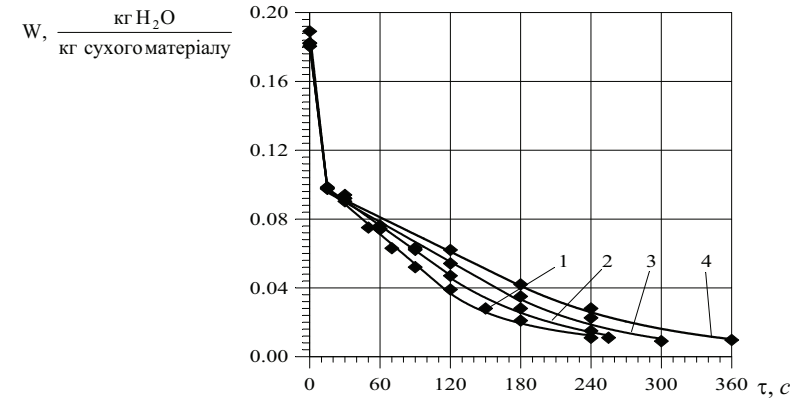


Рис. 4. Кінетика сушіння полідисперсної суміші вугілля, $T=318$ К: $\Delta P_c=5886$ Па.
1 – $H=45 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $H=60 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $H=75 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $H=90 \cdot 10^{-3}$ м

На рис. 5 представлено кореляційну залежність між експериментальними та розрахованими за формулами (5) і (6) значеннями вологості полідисперсної суміші вугілля у першому та другому умовних періодах. Абсолютна відносна похибка не перевищує 22 %, що для проектних розрахунків сушильного обладнання цілком задовільно.

Висновок. Кінетичні криві сушіння полідисперсної суміші вугілля носять проміжний характер порівняно з кінетичними кривими окремих фракцій і їх вигляд залежить від процентного вмісту окремих фракцій у загальній суміші. Отримані розрахункові залежності для прогнозування зміни вологості в першому та другому умовних періодах залежно від висоти шару, температури, перепаду тисків і дисперсного складу суміші. Встановлено, що дисперсний склад впливає на величину механічного витіснення і винесення вологи, які відбуваються без затрат теплової енергії.

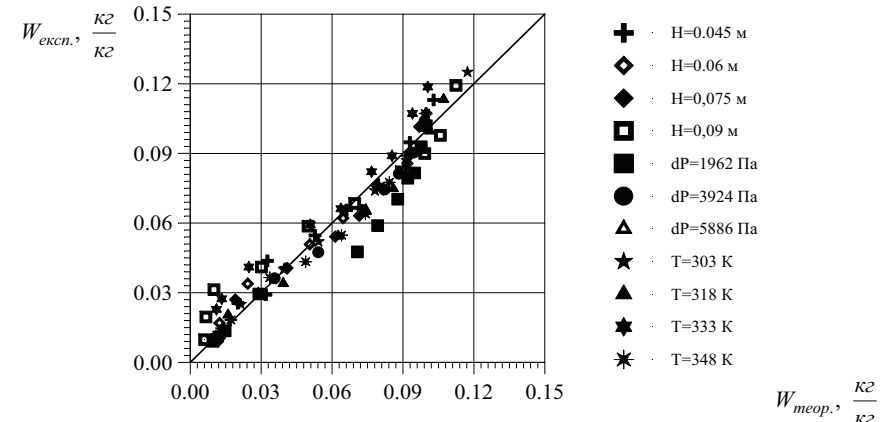


Рис. 5. Кореляційна залежність між розрахованими за формулами (5) і (6) і експериментальними значеннями для полідисперсної суміші вугілля

Умовні позначення: A, B, A^*, B^* – коефіцієнти, які визначаються експериментально, a – питома поверхня шару зернистого матеріалу, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $d_{\text{ум.}}$ – умовний діаметр частинок, м ; H – висота шару зернистого матеріалу, м ; n – кількість фракцій; N – швидкість сушіння у першому умовному періоді, $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{с}} N_{\Delta P}$ – степінь впливу окремої фракції на гідралічний опір стосовно фракції, що має найменший опір ($d=(6,0 \div 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$); T – температура теплоносія, К ; $W_o, W, W_{кр}, W_p$ – відповідно, початковий, біжучий, критичний та рівноважний вологовміст матеріалу, $\frac{\text{кг } H_2O}{\text{кг с.м.}}$; x_i – процентний вміст фракції у загальній суміші; ΔP – втрата тиску, Па ; μ – в'язкість повітря, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ρ – густина теплоносія, $\text{кг}/\text{м}^3$; ε – вільний об'єм, $\text{м}^3/\text{м}^3$; τ – час сушіння, с ; ω_o – фіктивна швидкість руху теплоносія, $\text{м}/\text{с}$.

Література

1. Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Вплив дисперсного складу вугілля на кінетику сушіння у щільному шарі// Наук. вісн. УкрДЛТУ: Розробка сучасних технологій деревообробки. – Львів: УкрДЛТУ. – 2002, вип. 12.5. – С. 111-115.
2. Мисак Й.С., Омелянський П.Й., Кравець Т.Ю. Економічна ефективність використання низькоякісного твердого палива західного регіону України. Тези доповіді на міжнар. наук.-техн. конференц. Енергоефективність. – К., – 2002. – С. 113.
3. Сушіння паливних матеріалів у щільному шарі, як метод інтенсифікації та енергозбереження. Тези доповіді на міжнар. наук.-техн. конференц. Енергоефективність. – К., – 2002. – С. 93.
4. Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару. Хімічна промисловість України. – 2002, № 6. – С. 38-42.
5. Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Вплив фракційного складу вугілля на гідродинаміку і кінетику сушіння у щільному шарі// Вісник НУ "Львівська політехніка": Хімія, технологія речовин та їх застосування. – Львів: НУ "Львівська політехніка" – 2002, № 461. – С. 245-252.
6. Ханік Я.М. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов. – Дис. доктора техн. наук. – Львов, 1992. – 401 с.

УДК 674.047 Проф. Я.І. Соколовський, д-р техн. наук; асист. М.В. Дендюк;
доц. Б.П. Поберейко, канд. техн. наук – УкрДЛТУ

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНО-РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ДЕРЕВИНІ ПІД ЧАС СУШІННЯ

Розглянуто математичну модель розрахунку двовимірних деформаційно-релаксаційних полів у висушуваній деревині. Методом скінчених елементів отримано чисельні розв'язки задачі у випадку сталих коефіцієнтів. Проаналізовано вплив різних факторів на розподіл деформаційно-релаксаційних полів деревини у процесі конвективного сушіння.

Prof. Ya.I. Sokolovskij; assist. M.V. Dendyuk; doc. B.P. Poberejko – USUFWT

Modeling of deformation-relaxational process in drying wood

We have considered the mathematical model of calculation of the deformation-relaxational fields in drying wood. By the finite elements method we have obtained the numerical solution of the problem in case of constant coefficients. We have analyzed the influ-

ences of the various factors on a distribution of deformation-relaxational fields of wood in the convective drying process.

1. Актуальність досліджень

Розробка нових та удосконалення існуючих прогресивних технологій сушіння деревини гостро ставить питання створення універсальних методів синтезу та аналізу деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних полів у висушуваних пиломатеріалах. Адже значні за величиною величини напружень є основним стримуючим фактором для інтенсифікації процесу сушіння.

Вирішення даного питання ускладнюється тим, що деревина належить до класу фізично-нелінійних гідрофільних полімерів, які характеризуються значною мілілістівістю структурних і фізико-механічних властивостей.

2. Аналіз відомих досліджень

Проблемі синтезу та аналізу реологічної поведінки деревини у процесі сушіння присвячено значну кількість робіт теоретичного та експериментального характеру. Напруження і деформації, які виникають у висушуваній деревині, проаналізовані у [1-3] на розрахункових стержневих одноосних моделях для заданої функції вологості за товщиною пиломатеріалів з врахуванням залежності модуля пружності від вологості. Застосування чисельних методів дозволило розв'язати плоску задачу розрахунку напружень у висушуваних пиломатеріалах у рамках теорії пружності [4-7]. Для робіт [8, 9] є характерним підхід, який обґрунтовується існуванням особливого механізму утворення механіко-сорбційної повзучості і виявленого для умов циклічної зміни вологості навантаженої деревини. Особливості деформування деревини з врахуванням в'язкопружних властивостей у рамках одновимірної задачі наведено в роботах [10, 11].

У даній роботі методом скінченого елемента (МСЕ) визначено напружено-деформівний стан висушуваної деревини як двовимірного анізотропного матеріалу з врахуванням реологічної поведінки. Дані результати є продовженням досліджень [12-14], у яких визначався напружено-деформівний стан (НДС) деревини у процесі сушіння без в'язкопружних властивостей матеріалу. Для цього у статті проведено узагальнення МСЕ для визначення напружень у двовимірному анізотропному матеріалі з врахуванням реологічних властивостей.

3. Постановка задачі і математична модель

Визначення НДС деревини у процесі сушіння базується на основі моделювання зв'язку деформаційно-релаксаційних і масообмінних процесів з використанням загальних положень термодинаміки незворотних процесів і методів механіки суцільного середовища. У випадку двовимірної задачі в'язкопружності, де розглядається прямокутний переріз пиломатеріалу (рис. 1), компонентами деформацій ε_{ij} і напружень σ_{ij} будуть:

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \varepsilon_{12}] \text{ та } \{\sigma\}^T = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{12}], \quad (1)$$

де x, y – координатні осі позначені відповідно 1 і 2.