

**В.М.АТАМАНЮК**, докт.техн.наук, зав. каф., НУ “Львівська політехніка”, Львів  
**М.І.МОСЮК**, асп., НУ “Львівська політехніка, Львів  
**Ю.Й.ЯТЧИШИН**, канд. техн. наук, доц., НУ “Львівська політехніка”, Львів

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ “ЕНЕРГЕТИЧНОЇ” ВЕРБИ**

В статті наведені експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібненої “енергетичної верби”. Наведені розрахунки ефективності сушіння фільтраційним методом та зроблено порівняльний аналіз з сушінням в барабанній сушарці та киплячого шару. Запропонована методика вибору параметрів процесу та розрахунку основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння.

Ключові слова: “енергетична” верба, вологовміст, кінетика сушіння, тепловий агент, теплообмін, фільтраційне сушіння.

В статье приведены экспериментальные исследования кинетики фильтрационной сушки измельченной “энергетической вербы”. Приведенные расчеты эффективности сушки фильтрационным методом и сделан сравнительный анализ с сушкой в барабанной сушилке и кипящего слоя. Предложенная методика выбора параметров процесса и расчета основных конструктивных размеров установки фильтрационной сушки.

Ключевые слова: “энергетическая” верба, влагосодержание, кинетика сушки, тепловой агент, теплообмен, фильтрационная сушка.

The article contains experimental studies of the kinetics of filtration drying crushed “energy willow”. There are calculations of drying efficiency filtration method and the comparative analysis of drying in the dryer drum and fluid bed. The proposed method of selecting process parameters and calculation of the size anal basic installation of filtration drying.

Key words: “power” willow, vologovmist, kinetics of drying, thermal agent, heat exchange, lauter drying.

### **Постановка проблеми**

Україна лише частково забезпечує себе традиційними видами первинної енергії, тому більшу частину змушена імпортувати. За даними експертів Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України розвіданих запасів нафти та газу залишилось на 40-50 а, вугілля – 400 років [1]. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) на основі біомаси. Виробництво твердого біопалива стрімко розвивається у більшості європейських країнах. На сьогоднішній день ВДЕ покривають 7% енергоспоживання країн ЄС, зокрема біомаса – 4%. В окремих країнах частка біомаси в загальному споживанні первинних енергоносіїв значно перевищує середньоєвропейську і становить у Фінляндії 23%, у Данії – 12%, в Австрії – 12% [2].

На даний час широкого використання набуває вирощування спеціальних насаджень, які надають екологічно чисту сировину для виробництва біопалива [3]. Процесами утворення таких насаджень, на відміну від традиційних джерел енергії (вугілля, нафти, газу), можна керувати. Такими насадженнями є плантації швидкоростучої енергетичної верби. Україна має значний потенціал твердої

біомаси яку можна використати для виробництва твердого біопалива [4] і отримувати як теплову, так і електричну енергію.

### **Аналіз останніх публікацій**

Використанню відновлювальних джерел енергії присвячені роботи багатьох авторів, зокрема [5-7]. В цих публікаціях увага зосереджена на аналізі наявних біоресурсів і перспективах розвитку біоенергетики, а також проблемах висушування і спалювання брикетів, пелет або гранул. Як стверджують автори [6, 7] з точки зору співвідношення “затрати – одержання” енергії, біомаса є найбільш раціональним джерелом. Однак, невирішеним на сьогодні завданням широкого використання біомаси в енергетиці є ефективне висушування подрібненої деревної маси і створення сучасного високоінтенсивного обладнання для її подрібнення, висушування, гранулювання та спалювання. На підприємствах з виробництва деревних брикетів, гранул або пелет для висушування подрібненої “енергетичної” верби, в основному, використовують барабанні сушарки і киплячого шару. Відомо, що до недоліків цих сушарок відносять високу енергоємність, за рахунок неповного використання сушильного потенціалу теплового агента (температура на виході з цих сушарок становить 80 – 120°C), нерівномірність вологості окремих частинок у сушарках киплячого шару, малі значення коефіцієнтів тепловіддачі (для барабанних сушарок) внаслідок невеликої швидкості руху теплового агента ( $\leq 1 \text{ м/с}$ ), громіздкість обладнання (довжина сушильних барабанів становить 20 – 30 м) і потреба у встановленні очисного обладнання для вловлювання дрібних часток, які виносяться із тепловим агентом [8, 9].

Аналіз джерел літератури також показав, що кінетиці сушіння подрібненої деревини і розрахунку сушильного обладнання на сьогодні приділяється недостатня увага, тому наукові та експериментальні дослідження процесів висушування подрібненої деревини мають актуальне значення.

Відомо [10-12], що фільтраційне сушіння належить до високоінтенсивних методів, тому ми досліджували процес висушування подрібненої “енергетичної” верби саме цим методом. Це дасть змогу зменшити затрати теплової енергії, за рахунок використання низькотемпературного теплового агента, температура якого не перевищує 120°C на вході і 25–40°C на виході, громіздкість та металоємність сушильного обладнання, за рахунок виключення очисного обладнання (сушіння відбувається в стаціонарному шарі і винесення дрібнодисперсної фракції відсутнє) і, відповідно, дасть змогу зменшити собівартість готової продукції [13].

**Метою** роботи є визначення оптимальних параметрів фільтраційного сушіння подрібненої “енергетичної” верби, розроблення методики розрахунку сушильного обладнання, а також порівняння експлуатаційних затрат пропонованим та методами, які сьогодні використовуються в промисловості.

### **Результати досліджень**

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння подрібненої “енергетичної” верби за різних параметрів процесу графічно представлені на рис. 1. Експерименти проводили на установці та за методикою наведеною в [14]. Зміну вологовмісту визначали ваговим методом у розрахунку

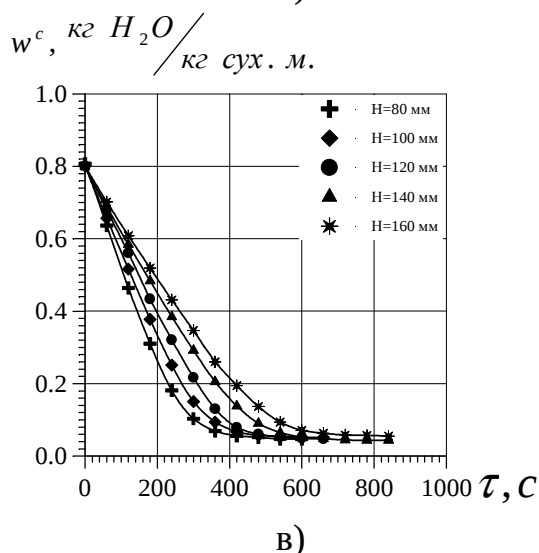
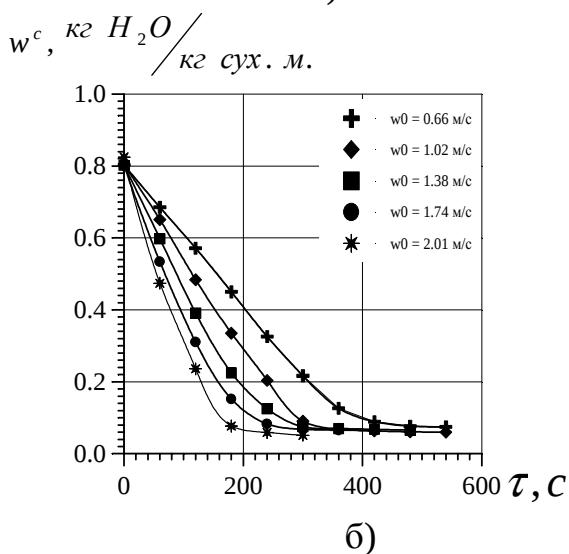
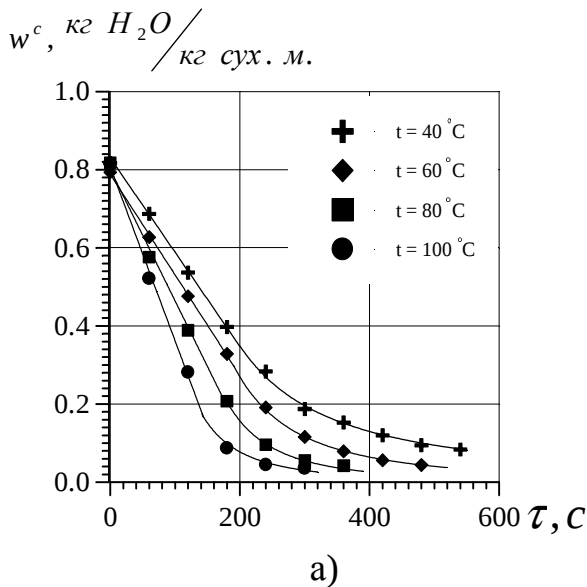


Рис.1. Кінетика сушіння шару подрібненої “енергетичної” верби за різних параметрів процесу:

- а)  $H = 120 \text{ мм}$ ,  $w_0 = 1.74 \text{ м/с}$ ,  $t = 40 - 100^\circ \text{C}$   
 б)  $H = 120 \text{ мм}$ ,  $t = 80^\circ \text{C}$ ,  $w_0 = 0.66 - 2.01 \text{ м/с}$ .  
 в)  $H = 80 - 160 \text{ мм}$ ,  $w_0 = 1.74 \text{ м/с}$ ,  $t = 60^\circ \text{C}$ .

на суху масу.

Як бачимо з рис. 1, кінетичні криві мають класичний характер, тобто на них можна виокремити “перший” та “другий” періоди. Однак механізм фільтраційного сушіння є дещо відмінним [15], ніж у випадку конвективного сушіння в стаціонарному шарі, коли в першому періоді видаляється вільна волога, а в другому – зв’язана.

Відомо, що фільтраційне сушіння носить зональний характер [13, 15] і зона масообміну переміщається в напрямку руху теплового агента, внаслідок цього в шарі одночасно існують сухий і вологий матеріал, тобто видаляється вільна і зв’язана волога. Частка сухого матеріалу зростає, а вологого зменшується. Тому на кінетичній кривій сушіння “перший” умовний період існує до тих пір доки тепловий агент повністю насичується вологою, а з шару видаляється однакова кількість вологи за рахунок розширення зони масообміну в напрямку до перфорованої перегородки. Як тільки зона масообміну сягає перфорованої перегородки тепловий агент неповністю насичується вологою і кількість вологи, що виноситься із шару зменшується, тому на кінетичній кривій маємо “другий” умовний період. Аналіз кінетичних кривих дає змогу визначити необхідний час висушування шару подрібненої деревини до заданого вологовмісту і відповідно енергетичні затрати на процес.

Важливою паливно-енергетичною характеристикою палива є його нижча теплотворна здатність, яка зокрема залежить і від вологості матеріалу. Для визначення теплотворної здатності подрібненої “енергетичної” верби використовували “калориметричну”

бомбу, дослідження проводили за методикою наведеною у [16].

Результати цих досліджень представлені на графічній залежності рис. 2 (лінія 1).

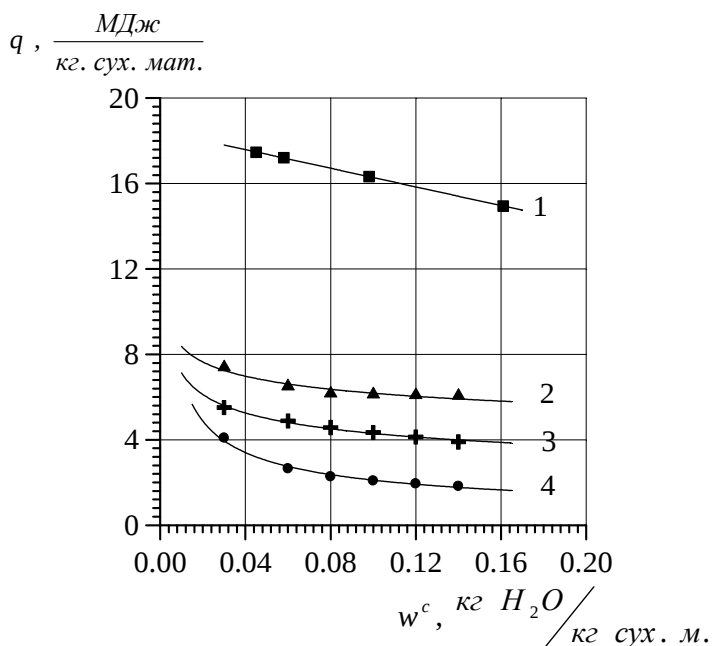


Рис. 2. Залежність нижчої теплотворної здатності подрібненої “енергетичної” верби та затрат теплової енергії на процес її висушування від кінцевої вологості:

1 – нижча теплотворна здатність (експериментальні дані)

Затрати на процес висушування  
2 – в сушарці киплячого шару; 3 – в барабанній сушарці; 4 – фільтраційне сушіння (експериментальні усереднені значення для  $t = 40 \div 100^\circ\text{C}$ ,  $H = 80 - 160 \text{ мм}$ ,  $w = 0,66 - 2,01 \text{ м/с}$ )

подрібненої енергетичної верби, швидкістю фільтрування теплового агенту та його температури із залежності:

$$q_{G_c}^t = \frac{c \cdot v_0 \cdot S \cdot \rho \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{н.с.}}) \cdot \tau_k}{G_c} \quad (1)$$

де  $c$  – теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;  $G_c$  – маса сухого матеріалу,  $\text{кг}$ ;  $t$  – температура теплового агента, відповідно на вході і навколишнього середовища  $^\circ\text{C}$ ;  $S$  – площа поперечного перерізу контейнера,  $\text{м}^2$ ;  $\tau_k$  – час сушіння до кінцевої вологості,  $\text{с}$ ;  $v_0$  – фіктивна швидкість фільтрування теплового агенту,  $\text{м/с}$ ;  $\rho$  – густина теплового агенту (повітря),  $\text{кг/м}^3$ .

Затрати енергії на створення перепаду тисків визначали із залежності:

$$q_{G_c}^{\Delta P} = \frac{\Delta P \cdot v_0 \cdot S \cdot \tau_k}{\eta \cdot G_c} \quad (2)$$

де  $\Delta P$  - втрати тиску,  $\text{Па}$ ;  $\eta$  – ккд установки (приймали  $\eta = 0,7$ ).

Сумарні затрати на процес висушування визначали із залежності:

Як бачимо, зі зростанням вологості нижча теплотворна здатність падає, тому що частина енергії затрачається на випаровування води. З іншої сторони, висушування подрібненої “енергетичної” верби вимагає затрат енергії. Зрозуміло, що чим нижча кінцева вологість тим більше необхідно затратити енергії на її висушування. Відомо, що згідно з технологією виготовлення паливних брикетів, пелетів та гранул для забезпечення їх міцності вологість вихідної сировини не повинна перевищувати 4-12%. Тому наші дослідження проводились з врахуванням цих вимог.

Для порівняння на рис. 2 також наведені розрахунки затрат енергії для сушіння подрібненої “енергетичної” верби в обертовому сушильному барабані і установці киплячого шару.

Затрати теплоти на процес фільтраційного висушування визначали за часом сушіння

$$\bar{q} = q_{G_c}^t + q_{G_c}^{AP} \quad (3)$$

Результати розрахунків необхідних затрат енергії для висушування подрібненої “енергетичної” верби фільтраційним методом за різних висот шару, швидкості фільтрування і температури теплового агенту наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Ефективність фільтраційного сушіння

| $w^c$ , кг/кг сух. мат. | Нижча теплотворна здатність<br>МДж/кг сух. мат. | МДж/кг сух. мат.                            |                |                                             |                |                                      |                  |
|-------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------|
|                         |                                                 | $H = (80 \div 160) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ |                | $t = (40 \div 100) \text{ } ^\circ\text{C}$ |                | $w_0 = (0,66 \div 2,01) \text{ м/с}$ |                  |
|                         |                                                 | $q_{\text{усер. затр.}}^H$                  | $\Delta q^H$   | $q_{\text{усер. затр.}}^t$                  | $\Delta q^t$   | $q_{\text{усер. затр.}}^{w_0}$       | $\Delta q^{w_0}$ |
| 0,03                    | 17,809                                          | 4,0771                                      | 13,7321        | 4,2795                                      | 13,5297        | 3,9455                               | 13,8637          |
| <b>0,04</b>             | 17,591                                          | 3,7433                                      | 13,8476        | 3,7932                                      | 13,7977        | 3,3963                               | 14,1946          |
| <b>0,05</b>             | 17,373                                          | 3,5033                                      | <b>13,8693</b> | 3,4544                                      | 13,9183        | 3,0235                               | 14,3491          |
| <b>0,06</b>             | 17,154                                          | 3,3187                                      | 13,8356        | 3,2002                                      | <b>13,9542</b> | 2,7495                               | <b>14,4048</b>   |
| <b>0,07</b>             | 16,936                                          | 3,1703                                      | 13,7658        | 2,9999                                      | 13,9362        | 2,5374                               | 14,3988          |
| <b>0,08</b>             | 16,718                                          | 3,0470                                      | 13,6708        | 2,8365                                      | 13,8813        | 2,3668                               | 14,3510          |
| <b>0,09</b>             | 16,500                                          | 2,9423                                      | 13,5572        | 2,6998                                      | 13,7997        | 2,2260                               | 14,2736          |
| <b>0,10</b>             | 16,281                                          | 2,8517                                      | 13,4295        | 2,5832                                      | 13,6981        | 2,1071                               | 14,1742          |
| 0,11                    | 16,063                                          | 2,7721                                      | 13,2908        | 2,4820                                      | 13,5811        | 2,0050                               | 14,0580          |
| 0,12                    | 15,845                                          | 2,7014                                      | 13,1433        | 2,3931                                      | 13,4517        | 1,9161                               | 13,9286          |
| 0,13                    | 15,626                                          | 2,6380                                      | 12,9884        | 2,3141                                      | 13,3124        | 1,8379                               | 13,7886          |
| 0,14                    | 15,408                                          | 2,5806                                      | 12,8276        | 2,2433                                      | 13,1649        | 1,7683                               | 13,6400          |

Зрозуміло, що із зростанням кінцевої вологості затрати зменшуються внаслідок зменшення часу висушування, тому щоби визначити ефективність фільтраційного сушіння в табл. 1 наведена корисна різниця між затраченою енергією і нижчою теплотворною здатністю. Як видно із табл. 1, корисна різниця під час фільтраційного сушіння має максимум, який в таблиці виділено жирним шрифтом.

Однак, максимальні значення корисної різниці є дуже близькі між собою, це пояснюється тим, що під час сушіння із частинок видаляється внутрішня волога і кожна частинка зокрема висушується у другому періоді. Затрати на процес сушіння подрібненої “енергетичної” верби в обертовому сушильному барабані та установці киплячого шару розраховували на основі методик наведених у [8, 9, 17], результати розрахунків наведені у табл. 2.

Аналіз таблиці 2 дає змогу визначити корисну різницю між затраченою енергією на сушіння і нижчою теплотворною здатністю готового продукту.

Для порівняння ефективності сушіння подрібненої “енергетичної” верби різними методами на рис. 3 зображені результати наведені в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 2. Ефективність сушіння в установках киплячого шару та барабанній

| $w^c$ , кг/кг сух. мат. | Нижча теплотворна здатність<br>МДж/кг сух. мат. | МДж/кг сух. мат.                          |                             |                                              |                                |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
|                         |                                                 | Барабанна сушарка                         |                             | Сушарка киплячого шару                       |                                |
|                         |                                                 | $q_{\text{усер. затр.}}^{\text{Барабан}}$ | $\Delta q^{\text{Барабан}}$ | $q_{\text{усер. затр.}}^{\text{Кипл. шару}}$ | $\Delta q^{\text{Кипл. шару}}$ |
| 0,03                    | 17,809                                          | 5,5964                                    | 12,2128                     | 7,2390                                       | 10,5702                        |
| <b>0,04</b>             | 17,591                                          | 5,2535                                    | 12,3374                     | 6,9697                                       | <b>10,6212</b>                 |
| <b>0,05</b>             | 17,373                                          | 5,0022                                    | <b>12,3705</b>              | 6,7677                                       | 10,6049                        |
| <b>0,06</b>             | 17,154                                          | 4,8057                                    | 12,3486                     | 6,6071                                       | 10,5473                        |
| <b>0,07</b>             | 16,936                                          | 4,6457                                    | 12,2904                     | 6,4742                                       | 10,4619                        |
| <b>0,08</b>             | 16,718                                          | 4,5114                                    | 12,2065                     | 6,3613                                       | 10,3566                        |
| <b>0,09</b>             | 16,500                                          | 4,3961                                    | 12,1035                     | 6,2633                                       | 10,2363                        |
| <b>0,10</b>             | 16,281                                          | 4,2955                                    | 11,9858                     | 6,1770                                       | 10,1043                        |
| 0,11                    | 16,063                                          | 4,2065                                    | 11,8566                     | 6,0999                                       | 9,9632                         |
| 0,12                    | 15,845                                          | 4,1268                                    | 11,7179                     | 6,0303                                       | 9,8144                         |
| 0,13                    | 15,626                                          | 4,0549                                    | 11,5716                     | 5,9670                                       | 9,6594                         |
| 0,14                    | 15,408                                          | 3,9894                                    | 11,4189                     | 5,9091                                       | 9,4992                         |

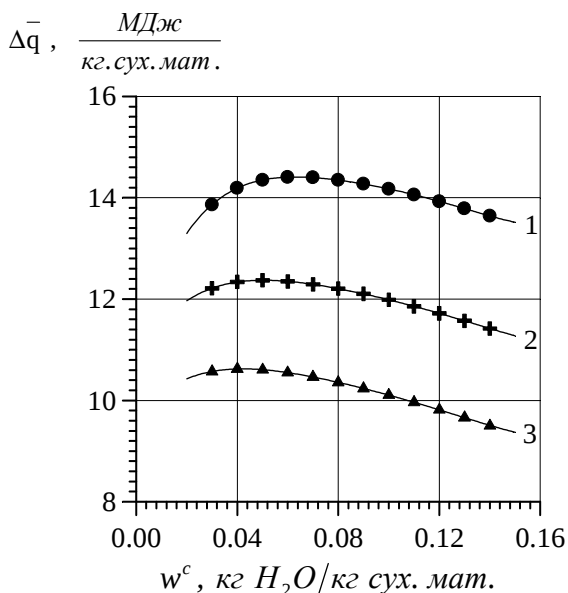


Рис. 3. Корисна різниця між нижчою теплотворною здатністю і затраченою енергією на сушіння від кінцевого вологовмісту подрібненої "енергетичної" верби: 1 – фільтраційне сушіння (експериментальні дані); 2 – барабанна сушарка (теоретичні дані); 3 – сушарка киплячого шар (теоретичні дані).

Як видно із рис. 3 застосування фільтраційного методу дасть змогу отримати на 80% енергії більше, ніж під час сушіння в обертовому сушильному барабані і на 120% більше, ніж в установці киплячого шару (див. рис. 2).

Для сушіння подрібненої "енергетичної" верби планується використовувати запропонована нами установка фільтраційного сушіння барабанного типу [18]. У зв'язку з тим, що методики розрахунку таких установок відсутні в технічній літературі, нами пропонується наступна методика її розрахунку:

1. Експериментально визначають основні параметри дисперсного матеріалу: середній розмір частинок, питому поверхню, початкову, критичну і кінцеву вологість, пористість шару,  $\varepsilon_{ш}$ ,

уявну і насипну густину, теплофізичні характеристики, а також всі необхідні довідкові дані.

2. На основі визначених оптимальних параметрів процесу фільтраційного сушіння подрібненої енергетичної верби задаємось основними параметрами процесу: температурою, висотою шару матеріалу, швидкістю руху теплового агента та необхідною продуктивністю.

3. Розраховуємо час висушування шару подрібненої енергетичної верби, який першим контактує з тепловим агентом до кінцевої вологості за розрахунковою залежністю:

$$\tau'_{II} = \frac{R^2}{D_w} \cdot \frac{\Delta\rho}{x_{нас} - x_n} \cdot \left( \frac{1}{6} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{w_k^c}{w_{kp}^c} \right)^{2/3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{w_k^c}{w_{kp}^c} + \frac{1}{3 \cdot Bi_d} \cdot \left( 1 - \frac{w_k^c}{w_{kp}^c} \right) \right) \quad (4)$$

де  $R$  - діаметр частинки,  $D_w$  - коефіцієнт внутрішньої дифузії,  $x_{нас}, x_n$  - вологовміст насичення і початковий,  $\Delta\rho = \rho_s / \rho$  - відносна густина,  $w_k^c, w_{kp}^c$  - відповідно кінцева і критична вологість матеріалу, кг  $H_2O$ /кг сух. м.

4. Розраховуємо час переміщення зони масообміну до перфорованої перегородки з розрахунковою залежності [19]:

$$\tau''_{II} = \frac{R^2}{D_w} \cdot \frac{\omega \cdot \Delta\rho}{x_{нас} - x_n}, \quad (5)$$

де  $\omega$  - безрозмірна довжина шару, яку визначають із залежності [19]:

$$\omega = \frac{a \cdot \xi \cdot (1 - \varepsilon) \cdot z}{v_0 \cdot R^2}, \quad (6)$$

де  $a$  - коефіцієнт температуропровідності,  $m^2/c$ ;  $\xi = \rho_s \cdot c_s / (\rho \cdot c)$  - відношення об'ємних теплот подрібненої енергетичної верби і теплового агента;  $z$  - вертикальна координата висоти шару, м.

5. Визначаємо загальний час сушіння до кінцевої вологості:

$$\tau'_3 = \tau'_{II} + \tau''_{II} \quad (7)$$

6. По кінетичних кривих (рис. 2) визначаємо зміну вологості матеріалу вздовж зони сушіння і середню вологість на кожній секції.

7. Розраховуємо середні втрати тиску в шарі вологої подрібненої енергетичної верби в кожній секції за залежністю [19]:

$$\Delta P_{B.M.} = \left( \frac{w^c - w_p}{w_0^c - w_p^c} \right) \cdot \Delta P_s + \left( \frac{w_0^c - w^c}{w_0^c - w_p^c} \right) \cdot \Delta P_c, \quad (8)$$

де  $\Delta P_c$  і  $\Delta P_s$  визначаються на основі критеріальних залежностей, причому  $\Delta P_s$  - розраховується при початковому значенні пористості шару;  $w^c, w_p$  - вологість середня і рівноважна, відповідно, коефіцієнт пропорційності, який у залежності від середнього біжучого вологовмісту, який міститься в шарі і відповідно висоту сухого матеріалу приймемо рівною:  $\frac{w_0^c - w^c}{w_0^c - w_p^c}$ , а висоту вологого

$$- \frac{w^c - w_p}{w_0^c - w_p^c}.$$

8. Розраховуємо втрати тиску з врахуванням втрат на подолання опору перфорованої перегородки в кожній секції вздовж зони сушіння, забезпечивши виконання умови  $\Delta P_{\text{сум.}} = \text{const}$ , з метою забезпечення однакової швидкості фільтрування теплового агента крізь шар дисперсного матеріалу вздовж зони сушіння:

$$\Delta P_{\text{сум.}} = \Delta P_{\text{в.м.}} + \Delta P_{\text{перф.перег.}} = \text{const}, \quad (9)$$

де  $\Delta P_{\text{в.м.}}$  – втрати тиску в шарі матеріалу;  $\Delta P_{\text{перф.перег.}}$  – втрати тиску в перфорованій перегородці, Па.

9. Розраховуємо живий переріз перфорованої перегородки кожної секції вздовж зони сушіння за розрахунковою залежністю [19]:

$$S = 1,74 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{\text{перф.перег.}}}{10^4 \cdot \rho \cdot v^2}}, \quad (10)$$

де  $v$  – швидкість руху теплового агента м/с.

10. Визначаємо продуктивність установки фільтраційного сушіння:

$$G = H \cdot A \cdot v_k \cdot \rho_{\text{нас}}, \quad (11)$$

де  $H$  – висота шару матеріалу, м;  $A$  – ширина перфорованого барабану, м;  $v_k$  – колова швидкість обертання барабану ( $v_k = 0,5 \div 2,0$  м/хв приймають залежно від загального часу сушіння  $\tau_z$ ),  $\rho_{\text{нас}}$  – насипна густина подрібненої “енергетичної” верби, кг/м<sup>3</sup>.

11. Визначаємо витрату теплового агента із залежності:

$$Q = L_{\text{заг.}} \cdot A \cdot w_0, \quad (12)$$

де  $L_{\text{заг.}}$  – загальна кількість теплового агента, яка необхідна на випаровування вологи, яку визначають із залежності [9]:

$$L_{\text{заг.}} = \frac{W}{3600 \cdot (w_0^c - w_k^c)}, \quad (13)$$

де  $W$  – кількість вологи, яку необхідно випарити, кг.

12. На основі отриманих даних вибираємо вентилятори для створення розрідження в сушарці і для нагнітання теплового агента з невеликим запасом щодо продуктивності на 5 – 8% відносно до необхідних витрат гарячого повітря і втрат тиску в системі нагріву.

Враховуючи той факт, що для більшості сушильних установок експлуатаційні затрати складають близько 90%, а капітальні 10% [8], порівнювали лише експлуатаційні затрати на процес сушіння, як найбільш затратної стадії в собівартості готового продукту. Розрахунок експлуатаційних затрат на реалізацію процесів сушіння у сушарці киплячого шару і обертовому сушильному барабанові проводили за методиками наведеними в [9, 10, 11]. Вихідні дані для розрахунку затрат на сушіння наведені в таблиці 3, а отримані результати розрахунків експлуатаційних затрат до вологості 0,08 кг H<sub>2</sub>O/кг. сух. наведені в таблиці 4.

Виробництво твердого біопалива в Україні стрімко розвивається, на даний час виготовляють близько 300 тис. т/рік твердого біопалива [21].

Таблиця 3. Вихідні дані для розрахунку затрат енергії на сушіння подрібненої “енергетичної” верби

|                                              |                                              |                                             |                                  |                                       |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| $w_n^c \text{ кг} H_2O / \text{кг. сух. м.}$ | $w_k^c \text{ кг} H_2O / \text{кг. сух. м.}$ | $\rho_{\text{нас}}, \text{кг} / \text{м}^3$ | $\rho_y, \text{кг} / \text{м}^3$ | $c_m, \text{кДж} / \text{кг} \cdot K$ |
| 0,8                                          | 0,08                                         | 90,54                                       | 455                              | 1,9                                   |

Таблиця 4. Результати розрахунку енергетичних затрат на процес висушування

| Позначення                                     | Методи сушіння       |                      |                        |
|------------------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
|                                                | Фільтраційне сушіння | Барабанна сушарка    | Сушарка киплячого шару |
| $t_n, ^\circ C$                                | 80                   | 300                  | 300                    |
| $t_k, ^\circ C$                                | 25                   | 80                   | 80                     |
| $w_0^c \text{ кг} H_2O / \text{кг. сух.}$      | 0,8                  |                      |                        |
| $w_k^c \text{ кг} H_2O / \text{кг. сух.}$      | 0,08                 |                      |                        |
| $G, \text{кг} H_2O$                            | 747,57               |                      |                        |
| $L, \text{кг} / \text{год}$                    | 5,85                 | 7,37                 | 73,58                  |
| $D, \text{м}$                                  | 2,5                  | 1,6                  | 1,07                   |
| $L_6, \text{м}$                                | 2                    | 16                   | -                      |
| $n, \text{об} / \text{хв}$                     | 0,2                  | 3,64                 | -                      |
| $a, \text{градус}$                             | -                    | 3                    | -                      |
| $N_6, \text{кВт}$                              | 4,64                 | 131,19               | -                      |
| $v_0, \text{м} / \text{с}$                     | 1,74                 | 0,7                  | 6,36                   |
| $N_{\text{вен}}, \text{кВт}$                   | 6,58                 | 2,07                 | 15,84                  |
| $Q_{\text{кг. сух. мат}} \text{ кДж}$          | 2750,14              | 4571,78              | 6166,24                |
| $Q, \text{кВт} \cdot \text{год}$               | 763,92               | 1269,94              | 1712,85                |
| $Q_\Sigma, \text{кВт} \cdot \text{год}$        | 775,15               | 1406,92              | 1723,38                |
| $\Delta Q_\Sigma, \text{кВт} \cdot \text{год}$ |                      | <b><u>631,77</u></b> | <b><u>948,23</u></b>   |

В перерахунку на готову продукцію економія енергоресурсів буде становити 189531374,6 кВт/год у порівнянні із сушінням в обертовому барабані, і 284467979,1 кВт/год – сушарці киплячого шару.

### Висновки

1 Запропоновано методику розрахунку установки фільтраційного сушіння барабанного типу.

2 Визначено та обґрунтовано параметри процесу фільтраційного сушіння подрібненої “енергетичної” верби, за яких ефективність буде максимальною.

3 Наведено порівняння енергетичних затрат на процес висушування фільтраційним методом за різних параметрів процесу із затратами в обертовому сушильному барабані і установці киплячого шару.

**Список літератури:** 1.Кудря С.О. Законодавча база відновлюваної енергетики в Україні/С.О. Кудря//Відновлювана енергетика ХІІ століття: матер. 10-ої ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф. (14-18 вересня 2009 р.). [Електронний ресурс]. доступний з [http://www.ive.org.ua/conference\\_2009/kudrya%20res%20nikolaevka.pdf](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>. 3.Коржов В.Л. Значення біомаси дерев у процесі оптимізації енергетичного балансу України / В.Л. Коржов [Текст] // Наукові праці Лісівничої академії наук України : зб. наук. праць. – Львів : РВВ НЛТУ № 6 України. – 2008. 4. Гелетуха Г.Г. Энергетический потенциал биомассы в Украине [Текст]// Гелетуха Г.Г., Марценюк З.А. Промышленная теплотехника. -1998.-т.20, N 4. С. 52-55. 5.Симборський А.І. Сучасний стан і перспективи використання біотехнологій для виробництва електричної і теплової енергії в Україні [Текст]/ А.І. Симборський/ Проблеми загальної енергетики. –2004. №11, С.14-21. 6.Шевченко О.О. Використання вторинних ресурсів для ефективного теплопостачання виробничих та побутових приміщень в сільській місцевості [Текст]// О.О. Шевченко, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.В. Стовпник, О.А. Марчук / Науковий вісник Національного університету біо ресурсів і природокористування України. –2009. –Вип. 134, ч.2. С. 7.Лакида П.І. Енергетичне використання біомаси лісів України в умовах глобальних змін клімату [Текст]// П.І. Лакида, Р.Д. Василишин, Л.М. Матушевич, С.В. Зібцев / Науковий вісник НЛТУ України. –2009. Вип. 19.14. –С.18-22.8.Муштаев В.И. /. Сушка дисперсных материалов [Текст] / В.И. Муштаев., В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. 352 с. 9.Сажин Б.С. Научные основы техники сушки [Текст]/ Б.С. Сажин., В.Б. Сажин. М.: Наука , 1997 - 448с., ил. 10.Кіндзера Д.П. Вплив дисперсного складу вугілля на кінетику сушіння у щільному шарі [Текст]/ Д.П. Кіндзера., Я.М. Ханик., В.М. Атаманюк. Розробка сучасних технологій деревообробки. Науковий вісник. Вип.12.5. Львів: УкрДЛТУ, 2002, с.111-115. 11.Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепло масообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури [Текст]/. – Автореф.дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / Націон. ун-тет "Львівська політехніка". –Львів: 2001, -19 с. 12.Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів у щільному шарі [Текст]/: Автореф.дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / Націон. ун-тет "Львівська політехніка". –Львів: 2003. -20 с. 13.Аксельруд Г.А. Кинетика фильтрационного процесса сушки [Текст]/Г.А. Аксельруд., Я.Н. Ханьк., В.И. Топчий. // Химическая технология. – 1986, № 5. – С. 41-46. 14.Ханик Я.М. Гідродинаміка процесу фільтраційного сушіння матеріалів, для яких властиве явище сідання [Текст]/, Я.М. Ханик., Я.М. Гумницький., В.М. Атаманюк., П.В. Білей. Науковий вісник: Проблеми деревообробного виробництва. Збірник науково-технічних праць. Вип. 2. –Львів: УкрДЛТУ, 1994. 15.Атаманюк В.М. Дисперсні матеріали Механізм і кінетика фільтраційного сушіння // Хімічна промисловість України. К.: –2007. –№4, –С.24-29. 16.ГОСТ 147-95. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. [ИС "СтройКонсультант" Версия Регламент](#). Начало действия: 01.01.1997. –М. : Разработчики: [МТК 179 "Уголь и продукты его переработки"](#), 49 с. 17. Ликов А.В. Теория сушки [Текст] / А.В. Ликов. М., «Энергия», 1968. 472 с. 18. UA, МПК 2011.01. Установка фільтраційного сушіння сипких матеріалів [Текст] / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Мосюк М.І. (UA) 59741; заяв у 2010 13918; опубл. 25.05.2011, Бюл №10. 19.Атаманюк В.М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.17.08 / Націон. ун-тет "Львівська політехніка". –Львів: 2007. -36 с.20.Меньшутина Н.В. Методология анализа энергопотребления сушильного оборудования при использовании динамических критериев [Текст] // Н.В. Меньшутина., Т Кудра., Л.С. Гордеев., М.Г. Гордиенко. Промышленная теплотехника. К:-2003,Т.25, №4. 21.Габрель М.С., – Виробництво біопалива в Україні: стан та перспективи розвитку [Текст]/ М.С Габрель. Науковий вісник НЛТУ. – 2011. – вип. 21.9. 126с.

*Поступила в редколлегию 11.09.2011*