

## Математичне моделювання динаміки сушіння біомаси

Наталія Сорокова<sup>1</sup>, Юлія Кольчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України,  
2а, вул. Желябова, Київ, Україна, 03057  
n.sorokova@ukr.net, orcid.org/0000-0002-3529-

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037  
yuliia.kolchik@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4559-5725

DOI 10.32347/2310-0516.2019.12.42-50

**Анотація.** Розроблено математичну модель та чисельний метод розрахунку динаміки тепло-масопереносу при сушінні біомаси, що використовується в якості сировини при виробництві паливних пелет. Математична модель будувалася на базі диференціального рівняння переносу субстанції (енергії, маси, імпульсу) для систем, що деформуються. Отримані результати чисельного моделювання підтверджені фізичним експериментом по зневодненню частинок енергетичної верби в потоці повітря. Це свідчить про адекватність математичної моделі, ефективності методу її реалізації і дозволяє використовувати її для дослідження динаміки тепломасопереносу при сушінні частинок різних видів подрібненої біомаси; визначити час досягнення рівноважного вологовмісту в залежності від властивостей матеріалу і сушильного агента. Результати дослідження дозволяють вибирати оптимальні режимні параметри процесу з точки зору зниження енерговитрат і забезпечення якості висушеного продукту

**Ключові слова:** біомаса; сушка; математичне моделювання; циліндрична частка; барабанна сушарка; чисельні методи.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В умовах постійного зростання світових цін на традиційні енергоносії, які використовуються в системах теплопостачання



**Наталія Сорокова**  
Провідний науковий співробітник  
д.т.н., с.н.с.



**Юлія Кольчик**  
доцент кафедри  
теплотехніки  
к.т.н., доцент

та збільшення частки децентралізованого теплопостачання, актуальним є використання альтернативних видів палива, одним з яких є пелети. Вони являють собою гранули з відходів деревини та сільського господарства діаметром 6-8 см і довжиною 50 мм. Котли, що працюють на пелетах, вважаються відносно новим видом опалювальних систем.

Широке поширення вони отримали в країнах Європи в дев'яностих роках минулого століття після істотного зростання цін на газ, а також завдяки економічності,

відносній безпеці та екологічній чистоті, що багато в чому визначається якістю пелет. Такі котли, мають ККД близько 89-95 відсотків, витрати на їх придбання та установку окупаються в найкоротші терміни. Виробники також пропонують моделі, оснащені додатковим контуром гарячого водопостачання.

Пеллети відносяться до біопалива з високими теплотворними характеристиками і мають відносно невисоку ціну. Завдяки пресованій структурі вони зручні в транспортуванні і зберіганні. Після згоряння зольний залишок складає всього 1-3 відсотки від об'єму палива, складається з природних мінералів і його можна використати в якості добрива. Використання біомаси рослинного і деревного походження як сировини для отримання паливних брикетів і гранул останніми роками стає все більш популярним напрямом поновлюваної енергетики у світі. Для виробництва пеллет сировина повинна мати вологість 8 - 12%. У більшості видів біо-маси (солома, стебла кукурудзи, соняшнику, деревинна стружка, енергетична верба, сорго) початковий зміст вологи по відношенню до загальної маси складає 50 - 60% [1-4]. Правильна організація процесу сушки початкової сировини найбільшою мірою визначає якість паливних пеллет. Процес сушки біомаси це одна з основних статей витрат при виробництві пеллет і тому його треба ретельно планувати [5, 6]. Сушка здійснюється переважно у барабанних сушарних установках, які оснащені різноманітними перемішувачами пристроями, які усувають негативний ефект адгезії і сприяють рівномірному обдуванню висушеного матеріалу [7]. У сушарну установку біомаса подається після її попереднього подрібнення. Залежно від температури  $T_c$  теплоносія, сушка може бути помірна інтенсивною ( $T_c$  складає 120 - 170 °C) і високотемпературною (при  $T_c$  300– 500 °C) [8]. Після досягнення частками біомаси температури 150°C починається термічне розкладання найменш стійких складових біомаси з виділенням кисневмісних газів, що підвищує калорійність залишку і, відповідно, біопалива в цілому.

Проте нагрів часток біомаси до температури 270°C і вище негативно позначається на якості сировини. Це обумовлено інтенсивним проходженням екзотермічних процесів подальших стадій термодеструкції, що призводять до втрати горючої складової сировини. Отже, важливим моментом в розробці технології сушки біомаси є умова досягнення частками температури розкладання, але не перевищення критичних температур.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Створення сушарних технологій і апаратів вимагає детального вивчення явищ тепломасопереносу і фазових перетворень у висушеному матеріалі. Експериментальне дослідження кінетики сушки часток біопалива малого розміру в умовах досить високих температур пов'язане з істотними труднощами. Перспективним методом дослідження є математичне моделювання динаміки сушки поодинокі пористої частки в потоці сушарного агента [9, 10].

У [11] була побудована математична модель і метод розрахунку динаміки дифузійної сушки капілярно-пористих тіл у формі обмеженого циліндра. Частки усіх видів біомаси є колоїдними капілярно-пористими тілами. У роботі, на базі диференціального рівняння перенесення субстанції [12] побудована математична модель динаміки тепло-масопереносу, фазових перетворень і усадки при сушці колоїдних капілярно-пористих тел. Сушка у високотемпературному сушарному агенті припускає проходження процесів перенесення внаслідок дифузії, фільтрації і фазових перетворень. Зазвичай барабанні сушарні апарати оснащені лопаточними пристроями, які сприяють інтенсивному перемішуванню сировини і рівномірному обдуванню теплоносієм кожної частки. Форма подрібнених часток біомаси має вигляд порожнистих або суцільних циліндрів кінцевої довжини. Ці положення лягли в основу розробки математичної моделі динаміки сушки часток біомаси.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Математична модель тепло- і масопере- носу при обезводненні колоїдних капіляр-

$$c_{\text{эф}} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + w_{\text{эф}r} \frac{\partial T}{\partial r} + w_{\text{эф}y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{эф}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - LI_V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{ж}r} U_{\text{ж}})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{\text{ж}y} U_{\text{ж}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{\text{ж}} r \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\text{ж}} \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial y} \right) - I_V - \frac{U_{\text{ж}}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{п}r} U_{\text{п}})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{\text{п}y} U_{\text{п}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{\text{п}} r \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} \right) + I_V - \frac{U_{\text{п}}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{в}r} U_{\text{в}})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{\text{в}y} U_{\text{в}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{\text{в}} r \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\text{в}} \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial y} \right) - \frac{U_{\text{в}}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}. \quad (4)$$

Тут  $T$  – температура;  $U_{\text{ж}}$ ,  $U_{\text{п}}$ ,  $U_{\text{в}}$  – об'ємні концентрації рідкої, парової і повітряної фаз, що містяться в порах біомаси;  $t$  – время;  $c_{\text{эф}}$ , – ефективна теплоємність,  $c_{\text{эф}} = c_{\text{т}} U_{\text{т}} + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}}$ ;  $\lambda_{\text{эф}}$  – ефективна теплопровідність тіла,  $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{т}} U_{\text{т}} / \rho_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}$ ;  $D_{\text{ж}}$ ,  $D_{\text{п}}$ ,  $D_{\text{в}}$  – коефіцієнти дифузії фаз;  $A_D$  – енергія активації;  $I_V$  – інтенсивність випаровування рідини в порах тіла;  $L$  – теплота випаровування рідини;  $\varepsilon_V$  – відносна об'ємна деформація;  $w_{\text{эф}k}$  – ефективна швидкість зв'язаної речовини,  $w_{\text{эф}k} = [w_{\text{ж}k} c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + w_{\text{п}k} (c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}})] / c_{\text{эф}}$ , в напрямку  $k$  ( $k = r, y$ ).

Ефективний коефіцієнти дифузії рідини може бути знайдений по формулі М.І.Нікітенко [13]

$$D_{\text{ж}} = \gamma_D [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}, \quad (5)$$

коефіцієнти дифузії пари та повітря знаходяться по відомій формулі [6]

$$D_{\text{п}} = D_{\text{в}} = \gamma_{\text{п}} T^{3/2} / P_{\text{г}}, \quad (6)$$

Швидкості фільтрації  $w_{\psi}$  рідкої та газової фаз ( $\psi = \text{ж}, \text{г}$ ) знаходяться по закону Дарсі:  $w_{\psi} = -K_0 K_{\psi} / \eta_{\psi} \nabla P_{\psi}$ , где  $K_0$  – загальна проникність середовища;  $K_{\psi}$  – відносна проникність фази  $\psi$ ;  $\eta_{\psi}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості фази  $\psi$ ,  $P_{\psi}$  – парціальний

но-пористих часток у формі кінцевого циліндра представляється у вигляді :

тиск фази  $\psi$ . Для знаходження  $P_{\text{ж}}$  и  $P_{\text{г}}$  необхідно мати в наявності функції  $U_{\text{ж}}$ ,  $U_{\text{п}}$ ,  $U_{\text{в}}$  и  $T$ . При цьому визначаються об'ємні долі скелета  $\Psi_{\text{т}}$ , рідини  $\Psi_{\text{р}}$  та газу  $\Psi_{\text{г}}$  в пористих гранулах:  $\Psi_{\text{т}} = 1 - \Pi$ ,  $\Psi_{\text{ж}} = U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}$  та  $\Psi_{\text{г}} = 1 - \Psi_{\text{т}} - \Psi_{\text{ж}}$ , де  $\Pi$  – пористість,  $\rho_{\text{ж}}$  – густина рідини; розраховується парціальна густина пари і повітря  $\rho_{\text{п}} = U_{\text{п}} / \Psi_{\text{г}}$ ,  $\rho_{\text{в}} = U_{\text{в}} / \Psi_{\text{г}}$ , а потім парціальні тиски  $P_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} R_y T / \mu_{\text{п}}$  та  $P_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} R_y T / \mu_{\text{в}}$ . Тиск газової суміші представляється сумою  $P_{\text{г}} = P_{\text{п}} + P_{\text{в}}$ , а тиск рідкої фази рівний  $P_{\text{ж}} = P_{\text{г}} + P_{\text{к}}$ . Капілярний тиск  $P_{\text{к}}$  знаходиться як середній капілярний тиск рідини в порах тіла [12]:

$$P_{\text{к}} = 2\sigma(T) \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr / \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \theta(r) F(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}$$

де  $r^*$  – характеристичний параметр розмірів пір,  $r_{\text{min}} < r^* < r_{\text{max}}$ ;  $r_{\text{min}}$  і  $r_{\text{max}}$  – мінімальний та максимальний радіуси пір одиничного об'єму;  $F(r)$  – диференціальна функція розподілу пір по розмірам;  $\theta(r)$  – об'ємна доля капіляра, зайнята рідиною.

Інтенсивність випаровування на зовнішніх поверхнях часток [14, 15] знаходиться як різниця потоків рідини, що випаровується, і пари, що конденсується.

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_{\text{т}} \Big|_{v=0} \left( \exp \left[ A / (RT) \Big|_{v=0} \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left( \exp \left[ A / (RT_c) \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad (7)$$

Тут  $\gamma_c$  – коефіцієнт поверхневого випару,  $\gamma_c = \varepsilon \rho_{\text{ж}} \delta^* / 4$ ;  $\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювання;  $\delta^*$  – середня довжина дифузійно-

го перескока активізованої частки в шарі рідини;  $\varphi_T$  – вологість парогазової суміші, яка відповідає згідно з ізотермою сорбції концентрації  $U_{ж}$  в даній точці тіла;  $\nu$  – нормаль до поверхні;  $T_c$  и  $\varphi_c$  – температура і відносна вологість зовнішнього середовища;  $A$  – енергія активації.

Інтенсивність випаровування в порах одиничного об'єму тіла знаходиться по формулі, що впливає з (7) за умови локальної термодинамічної рівноваги фаз  $I_V = \gamma_c [\exp(A/RT) - 1]^{-1} (\varphi_T - \varphi) S$ , (8)

где  $S$  – площа контакту рідкої і газової фаз в порах не повністю заповнених рідиною. Для знаходження функції  $S$  в [15] отримана формула:

$$S = \frac{2\sqrt{1-\varphi_T}}{\rho_{ж}\delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T}, \quad (9)$$

Похідна  $\partial U_{ж}/\partial \varphi_T$  знаходиться з рівняння ізотерми десорбції. Якщо ізотерма задана у вигляді  $U_{ж} = U_{max} \varphi_T^g$ ,  $g = const$ , то  $\partial U_{ж}/\partial \varphi_T = U_{max} g \varphi_T^{g-1}$ . Дані по рівноважному вологовмісту для деревини [16] досить

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{ж}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{п}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{в}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial w_{жг}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{гг}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0. \quad (10)$$

$$\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T}{\partial v} \right|_{v=0} = \alpha (T_c - T|_{v=0}) - L \gamma_c \left\{ \varphi_T|_{v=0} \left[ \exp\left(\frac{A}{RT|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[ \exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (11)$$

$$D_{ж} \left. \frac{\partial U_{ж}}{\partial v} \right|_{v=0} = \gamma_c \left\{ \left[ \varphi_T|_{v=0} \exp\left(\frac{A}{RT|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[ \exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (12)$$

$$-D_{п} \left. \frac{\partial U_{п}}{\partial v} \right|_{v=0} = \gamma_{пс} (U_{п}|_{v=0} - \rho_{пс} \psi_{п}), \quad U_{в}|_{v=0} = \frac{P_c \psi_{г} \mu_{в}}{R T|_{v=0}} - U_{п}|_{v=0} \frac{\mu_{в}}{\mu_{п}}. \quad (13)$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  визначався по формулі [18]  $Nu = 0,98(0,43 + 0,55 Re^{0,5} Pr^{0,38})$ . Для порожнисто-го циліндра на поверхні  $r = r_0$  при  $T_c = const$  можна прийняти  $Nu = 3,66$  [18].

Рішення диференціальних рівнянь (1) - (4) може бути проведено чисельним методом на базі явної тришарової перерахунко-

$$\frac{\bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} - U_{ж,i,m}^n}{l} = - \left[ (w_{жг} U_{ж})_{i+1,m}^n - (w_{жг} U_{ж})_{i,m}^n \right] - \left[ (w_{жг} U_{ж})_{i,m}^n - (w_{жг} U_{ж})_{i-1,m}^n \right] / (2h^2) -$$

точно апроксимуються рівнянням  $W^{-1} = W_{max}^{-1} - 0,12 \ln \varphi$ , де максимальний вологовміст  $W_{max}$  відповідає відносній вологості повітря  $\varphi = 1$ , а  $U_{ж} = 0,01 W_{г}$ .

Відносна об'ємна деформація  $\varepsilon_V$  може бути знайдена на базі рівняння термоконцентраційної деформації М.І. Нікітенко [15], аналітичне рішення якого для осесиметричної задачі про напружений стан порожнисто-го циліндра, отримано в [17] за умови, що деформації відбуваються внаслідок неоднорідності полів температури і концентрації компонентів пов'язаної речовини. Якщо тіло є капілярно-пористим, його усадкою при сушці можна нехтувати і  $\varepsilon_V = 0$ .

Граничні умови на осі симетрії  $r = 0$  для суцільного циліндра представляють умови симетрії полів температури, концентрацій і швидкостей фільтрації компонентів зв'язаної речовини на зовнішніх поверхнях часток задаються умови тепло- і масообміну третього роду

вої різницевої схеми Нікітенко М.І. [17, 19] і процедурі розщеплювання алгоритму по фізичних чинниках. Різницева апроксимація рівняння (2) на нерівномірній різницевої сітці  $r_i = R_{вн} + ih$ , ( $i = 0, 1, \dots, I$ ;  $h \neq const$ ,  $R_{вн} > 0$ ),  $x_m = mh_y$ , ( $m = 0, 1, \dots, M$ ;  $h_y = const$ ),  $t_n = nl$  ( $n = 0, 1, \dots, l > 0$ ) відповідно до вказаної схеми представляється у вигляді

$$-\left[ \left( w_{жy} U_{ж} \right)_{i,m+1}^n - \left( w_{жy} U_{ж} \right)_{i,m}^n \right] - \left[ \left( w_{жy} U_{ж} \right)_{i,m}^n - \left( w_{жy} U_{ж} \right)_{i,m-1}^n \right] / (2h_y^2), \quad (14)$$

$$(1 + \Omega_{ж}) \frac{\tilde{U}_{ж,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i,m}^{n+1}}{l} - \Omega_{ж} \frac{U_{ж,i,m}^n - U_{ж,i,m}^{n-1}}{l} = - \left[ \left( w_{жr} \bar{U}_{ж} \right)_{i+1,m}^{n+1} - \left( w_{жr} \bar{U}_{ж} \right)_{i,m}^{n+1} \right] - \left[ \left( w_{жy} \bar{U}_{ж} \right)_{i,m+1}^{n+1} - \left( w_{жy} \bar{U}_{ж} \right)_{i,m}^{n+1} \right] / (2h^2) - \left[ \left( w_{жy} \bar{U}_{ж} \right)_{i,m}^{n+1} - \left( w_{жy} \bar{U}_{ж} \right)_{i-1,m}^{n+1} \right] / (2h^2) - \left[ \left( w_{жy} \bar{U}_{ж} \right)_{i,m}^{n+1} - \left( w_{жy} \bar{U}_{ж} \right)_{i,m-1}^{n+1} \right] / (2h^2) + \frac{1}{2r_{i,m}} \left[ \left( D_{ж,i+1,m} r_{i+1,m} + D_{ж,i,m} r_{i,m} \right) \left( \bar{U}_{ж,i+1,m}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} \right) - \left( D_{ж,i,m} r_{i,m} + D_{ж,i-1,m} r_{i-1,m} \right) \left( \bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i-1,m}^{n+1} \right) \right] / h^2 + \left[ \left( D_{ж,i,m+1} + D_{ж,i,m} \right) \left( \bar{U}_{ж,i,m+1}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} \right) - \left( D_{ж,i,m} + D_{ж,i,m-1} \right) \left( \bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) - I_V, \quad (15)$$

$$\frac{U_{ж,i}^{n+1} - \tilde{U}_{ж,i}^{n+1}}{l} = \frac{\tilde{U}_{ж,i}^{n+1}}{1 + \varepsilon_V} \frac{\varepsilon_V^{n+1} - \varepsilon_V^n}{l}. \quad (16)$$

Аналогічним чином апроксимуються рівняння (3)(4). Рівняння перенесення енергії (1) не містить функцію  $\varepsilon_V$ . Воно апроксимується першими двома різницевиими рівняннями.

Необхідні умови стійкості рівнянь виду (15) - (17) знаходяться методом умовного завдання деяких шуканих функцій системи

$$D_{ж} \frac{\bar{U}_{ж,i}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i-1}^{n+1}}{h} = \gamma_c \left\{ \varphi_{TI} \left[ \exp(A/R_y \bar{T}_I^n) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[ \exp(A/R_y T_c) - 1 \right]^{-1} \right\}. \quad (17)$$

**Обговорення результатів.** Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі і ефективності чисельного методу розрахунку було проведено фізичне моделювання кінетики сушки часток енергетичної верби циліндричної форми в потоці повітря і математичне моделювання процесу при тих самих початкових даних:  $T_0 = 303 \text{ K}$ ;  $W_0 = 1,3 \text{ кг/кг}$ ;  $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}$ ;  $\Pi = 0,58$ . Результати розрахунку і експериментальні дані, досить добре узгоджуються [20]. Також проведений розрахунок високотемпературної сушки циліндричних часток енергетичної верби в потоці димових газів в умовах рівномірного обдування. Температура теплоносія задавалася в інтервалі  $200\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис.1 представлені результати чисельних експериментів для деяких температур (а–д).

Для практичного використання результатів розрахунку динаміки сушки для визначення часу досягнення рівноважного вологовмісту частками цього розміру за-

[7]:

$$l_{ж} \leq \left\{ \left( w_{жr} / h + w_{жy} / h_y \right)^{-1} ; (1 + 2\Omega_{ж}) / \left[ 2D_{ж} (h^{-2} + h_y^{-2}) \right] \right\}.$$

Розрахунковий крок за часом визначається з умови  $l \leq \min(l_T; l_{ж}; l_{\Pi}; l_B)$ .

Різницева апроксимація граничної умови (13) для  $r = R$  представляється у вигляді

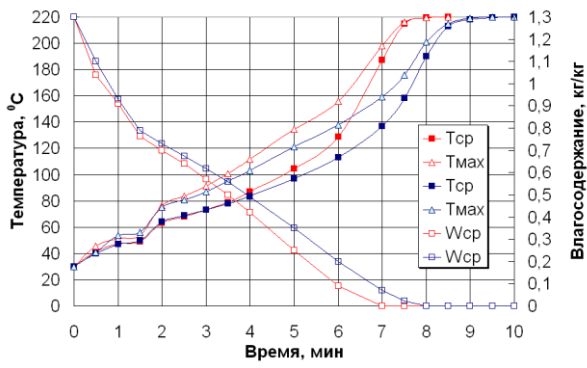
лежно від температури теплоносія, їх зручно узагальнювати у вигляді номограм. На рис.2 представлено узагальнення результатів, представлених на рис.1.

## ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

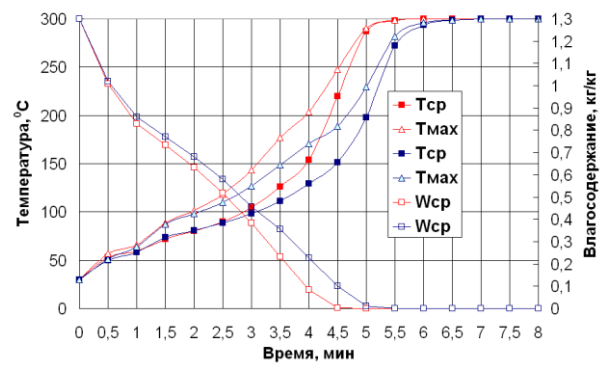
В результаті проведеного дослідження процесів тепломасопереносу і фазових перетворень при видаленні вологи з часток біомаси циліндричної форми показано:

1. При високотемпературній сушці ( $T_c = 220 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) має місце інтенсивне зневоднення, обумовлене невеликими розмірами часток ( $d = 4,2 - 5,6 \text{ мм}$ ,  $h = 10 \text{ мм}$ ) і високими коефіцієнтами тепловіддачі від димових газів

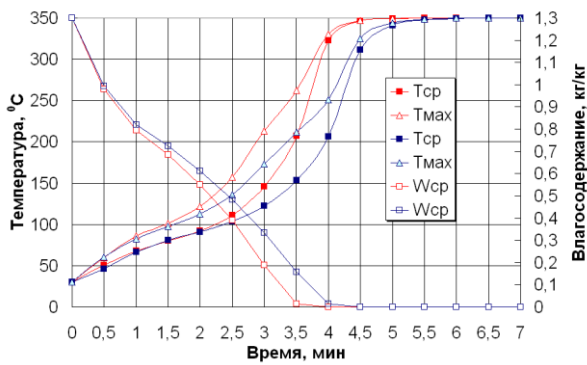
2. При досягненні матеріалом рівноважного вологовмісту, температура на зовнішніх поверхнях часток має значення нижче температури сушарного агента.



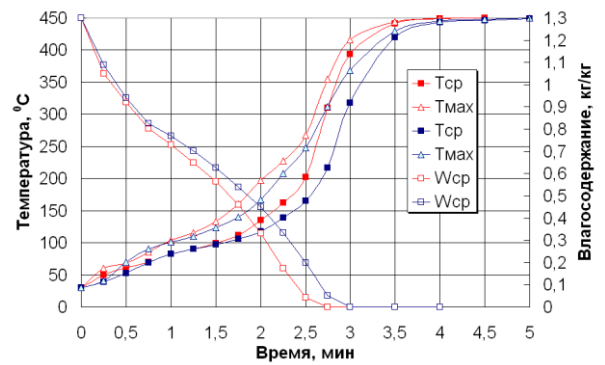
а)  $T_c = 220 \text{ }^\circ\text{C}$



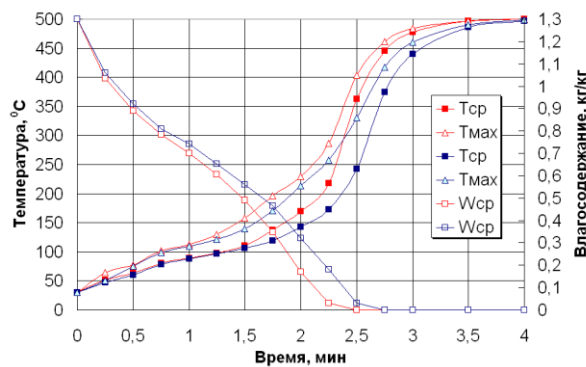
б)  $T_c = 300 \text{ }^\circ\text{C}$



в)  $T_c = 350 \text{ }^\circ\text{C}$



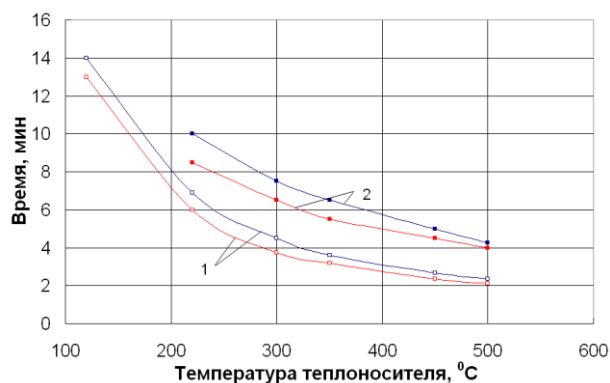
г)  $T_c = 450 \text{ }^\circ\text{C}$



д)  $T_c = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

**Рис. 1.** Зміна в часі середніх значень вологовмісту  $W$ , температури  $T$ , та максимальні температури  $T_{\text{max}}$  на поверхні циліндричних частинок енергетичної верби з розмірами  $d/h = 4,2 / 10$  мм (червоні лінії) та  $d/h = 5,6 / 10$  мм (сині лінії) при зневодненні в потоці сушарного агента з параметрами  $w_c = 2$  м/с,  $d_c = 18$  г/кг с.в. та різними значеннями температури  $T_c$ .

**Fig.1** The temporal variation of average values of moisture content  $W$ , temperature  $T$ , and maximum temperature  $T_{\text{max}}$  on the surface of cylindrical particles of energy willow with dimensions  $d / h = 4.2 / 10$  mm (red lines) and  $d / h = 5.6 / 10$  mm (blue line) with dehydration in the flow of the drying agent with the parameters  $w_c = 2$  m / s,  $d_c = 18$  g / kg s.v. and different temperatures  $T_c$ .



**Рис.2** Час досягнення частками енергетичної верби рівноважного (0,1 кг/кг) вологовмісту (криві 1) і температури теплоносія після зневоднення залежно від температури теплоносія.  $d/h = 4,2 / 10$  мм (криві 1) та  $d/h = 5,6 / 10$  мм (криві 2) при сушці без урахування термодеструкції і з її урахуванням ( $W$ ,  $T$ ,  $T_{\max}$ ) в потоці димових газів з параметрами  $w_c = 2$  м/с,  $d_c = 18$  г/кг с.п.

**Fig.2** The time it takes for the particles of energy willow to reach the equilibrium (0.1 kg / kg) moisture content (curves 1) and the temperature of the heat carrier after dehydration, depending on the heat carrier temperature.  $d / h = 4.2 / 10$  mm (curves 1) and  $d / h = 5.6 / 10$  mm (curves 2) when drying without accounting thermal destruction and with its account ( $W$ ,  $T$ ,  $T_{\max}$ ) in the stream flue gases with parameters  $w_c = 2$  m / s,  $d_c = 18$  g / kg s.v.

3. Таким чином для інтенсифікації процесу сушки і зниження його енергоємності можливо проводити процес при температурах теплоносія, що перевищують температуру термодеструкції для цього матеріалу. Перспективою подальшої роботи по данній тематиці являється проведення досліджень, що дозволяють оцінити вплив проходження процесу термодеструкції біомаси на динаміку її обезводнення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. **Colauzzi M., Serra P., Amaducci S.** Variety earliness effect on field drying of biomass sorghum. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 115. 2018. 160-173p.
2. **Munna Verma, Chanchal Loha, Amar Nath Sinha, Pradip Kumar Chatterjee.** Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 71. 2017. 732-741p
3. **Муштаев В.И., Ульянов В.М.** Сушка дисперсних матеріалів. М.: Хімія, 1988. 352 с.
4. **Gregg S.J., Sing K.S.W.** Adsorption, Surface Area and Porosity. London : Academic Press INC, 1982, 313 p.
5. **Conghui Gu, Zhulin Yuan, Shanshan Sun, Lei Guan, Kai Wu.** Simulation investigation of drying characteristics of wet filamentous biomass particles in a rotary kiln. *Fuel Processing Technology*. 2018. Vol. 178. 344-352p.
6. **Geert Haarlemmer.** Simulation study of improved biomass drying efficiency for biomass gasification plants by integration of the water gas shift section in the drying process. *Biomass and Bioenergy*. 2015. Vol. 81. 129-136p.
7. **Whitaker S.** Simultaneous heat and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advance in Heat Transfer*. Academic Press, New York. 1977. 119–203p.
8. **Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Боряк Л.А., Дабіжа Н.О.** Оптимізація процесу сушіння рослинних матеріалів. *Наукові праці*. 2006, Вип. 28, Т. 2, С. 219 – 222.
9. **Paraschiv Lizica Simona, Paraschiv Spiru, Ion V. Ion** Mathematical modelling of sawdust drying process for biomass pelleting. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 141. 150-154 p.
10. **Xiyan Li, Chungeng Yin.** A drying model for thermally large biomass particle pyrolysis. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. 1294-1302p
11. **Сорокова Н.М.** Математичне моделювання динаміки сушіння капілярно-пористих тіл циліндричної форми кінцевої довжини. *Харчова промисловість*. 2008. №6. С. 67 – 69.
12. **Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N.** Mathematical simulation of heat and mass transfer, phase conversions, and shrinkage for optimization of the process of drying of thermolabile materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005. vol.78. no 1. January. 75–89p.
13. **Nikitenko N.I.** Problems of the radiation theory of heat and mass transfer in solid and liquid

- media. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. 2000. vol.73, no 4. January.p 840-848p.
14. **Nikitenko N.I.** Investigation of the Dynamics of Evaporation of Condensed Bodies on the Basis of the Law of Spectral-Radiation Intensity of Particles”, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2002. vol.75. no 3. 684–692p. *Инж.-физ. журн.* 2002. Т.756 № 3. С. 128–134.
  15. **Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н., Кольчик Ю.Н.** Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена. *Киев : Наукова думка*, 2014. 744 с.
  16. **Ликов А.В.** Теория сушки. М. : Энергия, 1968. 372 с.
  17. **Nikitenko N.I., Kolchik Yu.N.** Method of canonical elements for modeling the transfer processes in multiply connected domains of arbitrary shape. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1999. vol.72. no 5. September. 808–814p.
  18. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
  19. **Nikitenko N.I., Kolchik Yu.N., Nikitenko N. N.** Numerical method of solving heat conduction problems for bodies of complex geometry. *Journal of engineering physics*. 1991. November, Vol. 61, Issue 5. 1430–1435p.
  20. **Сороковая Н.Н., Коринчук Д.Н., Кольчик Ю.Н.** Математическая модель и метод расчета динамики сушки биомассы при производстве пеллет. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2018. Вип.27. С 41-48.
  - tigation of drying characteristics of wet filamentous biomass particles in a rotary kiln. *Fuel Processing Technology*. Vol. 178. 344-352.
  6. **Geert Haarlemmer (2015).** Simulation study of improved biomass drying efficiency for biomass gasification plants by integration of the water gas shift section in the drying process. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 81. 129-136.
  7. **Whitaker S. (1977).** Simultaneous heat and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advances in Heat Transfer*. Academic Press, New York. 119–203p.
  8. **Snuzhkin Y.F., Shapar R.O., Boryak L.A., Dabizha N.O. (2006).** Optimization of the process of growing roslinnyh material. *Scientific works*, issue. 28, vol. 2, 219-222.
  9. **Paraschiv Lizica Simona , Paraschiv Spiru, Ion V. Ion (2017).** Mathematical modelling of sawdust drying process for biomass pelleting . *Energy Procedia*. Vol. 141. 150-154.
  10. **Xiyang Li, Chungeng Yin (2019).** A drying model for thermally large biomass particle pyrolysis. *Energy Procedia*. Vol. 158. 1294-1302
  11. **Sorokova N.M. (2008).** Matematychni modeliuvannia dynamiky sushinnia kapilarno-porystykh til tsylindrychnoi formy kintsevoi dovzhyny. *Kharchova promyslovisht*, no. 6, , 67-69.
  12. **Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N. (2005).** Mathematical simulation of heat and mass transfer, phase conversions, and shrinkage for optimization of the process of drying of thermolabile materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. vol.78. no 1. January. 75–89.
  13. **Nikitenko N.I. (2000).** Problems of the radiation theory of heat and mass transfer in solid and liquid media. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. vol.73, no 4. January.p 840-848.
  14. **Nikitenko N.I. (2002).** Investigation of the Dynamics of Evaporation of Condensed Bodies on the Basis of the Law of Spectral-Radiation Intensity of Particles”, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. vol.75. no 3. 684–692.
  15. **Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N., Kolchik Yu.N. (2014).** Molekulyarno-radiatsionnaya teoriya i metodyi rascheta teplo- i massoobmena. *Kiev: Naukova dumka*.
  16. **Lyikov A.V. (1968).** Teoriya sushki. М. : Energiya
  17. **Nikitenko N.I., Kolchik Yu.N. (1999).** Method of canonical elements for modeling the transfer processes in multiply connected domains of arbitrary shape. *Journal of Engineering Physics*

REFERENCES

1. **Colauzzi M., Serra P., Amaducci S. (2018).** Variety earliness effect on field drying of biomass sorghum. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 115. 160-173.
2. **Munna Verma, Chanchal Loha, Amar Nath Sinha, Pradip Kumar Chatterjee (2017).** Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 71. 732-741
3. **Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. (1988).** Drying dispersed materials. М. : Chemistry, 352.
4. **Gregg S.J., Sing K.S.W.** Adsorption, Surface Area and Porosity. *London : Academic Press INC*, 1982, 313.
5. **Conghui Gu, Zhulin Yuan, Shanshan Sun, Lei Guan, Kai Wu. (2018).** Simulation inves-



and *Thermophysics*. vol.72. no 5. September. 808–814.

18. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. (1981)**. *Teploperedacha. M. : Energoizdat*, 416.
19. **Nikitenko N.I., Kolchik Yu.N., Nikitenko N. N. (1991)**. Numerical method of solving heat conduction problems for bodies of complex geometry. *Journal of engineering physics*. November, Vol. 61, Issue 5. 1430–1435.
20. **Sorokova N.N., Korinchuk D.N., Kolchyk Ju.N. (2018)**. Mathematical model and method for calculating the dynamics of biomass drying in the production of pellets. *Ventilation, lighting and heat supply*. 27. 41-48.

### **Mathematical modeling of biomass drying dynamics**

*Natalia Sorokova, Julia Kolchyk*

**Summary.** Developed a mathematical model and a numerical method for calculating the dynamics of heat and mass transfer during the drying of biomass used as a raw material in the production of fuel. The mathematical model was built on the basis of the differential equation of substance transfer (energy, mass, momentum) for deformable systems. The results of numerical simulation are confirmed by a physical experiment on the dehydration of particles of energy willow in the air stream. This testifies to the adequacy of the math-

ematical model, the effectiveness of the method of its implementation, and allows you to use it to study the dynamics of heat and mass transfer during the drying of particles of various types of crushed biomass; determine the time to reach the equilibrium moisture content, depending on the properties of the material and the drying agent.

It is shown that during high-temperature drying there is intensive dehydration caused by small particle sizes and high coefficients of heat transfer from flue gases. When the material reaches equilibrium moisture content, the temperature on the outer surfaces of the particles has a value below the temperature of the drying agent. To intensify the drying process and reduce its energy intensity, it is possible to carry out the process at temperatures of the coolant exceeding the temperature of thermodestruction for this material. The results of the study allow you to select the optimal operating parameters of the process in terms of reducing energy consumption and ensuring the quality of the dried product.

The prospect of further work on this topic is to conduct studies to assess the impact of the process of thermodestruction of biomass on the dynamics of its dehydration.

**Keywords:** biomass; drying; mathematical modeling; cylindrical particle; drum dryer; numerical methods.