

*Рис. 2. Динаміка маси зразків*

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що для інтенсифікації сушіння сировини доцільно перед початком процесу проводити її підігрів шляхом прямого електроконтактного нагріву. Це дозволить зменшити час сушіння та знизити питомі енергозатрати на одиницю готової продукції.

**УДК 62-664.263**

## **ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ**

*Семірненко Ю.І., к.т.н., доцент кафедри проектування технічних систем*

*Семірненко С.Л., к.т.н., доцент кафедри проектування технічних систем*

*Сумський національний аграрний університет*

**Анотація:** *Запропонована енергозберігаюча технологія процесу сушки паливних брикетів із застосуванням їх власного тепла при їх виготовленні. Визначена середня температура теплоносія та маса води, що випаровується на виході брикетів із кожної ступені процесу сушки. Визначена загальна потужність додаткового нагрівача для забезпечення стандартної вологості брикетів.*

**Ключові слова:** *біомаса, сушка, схема, паливні брикети, ступені, випаровування, вологість, температура, повітря, кількість тепла, охолодження.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Енергозбереження – це глобальна проблема людства, яка пов'язується, перш за все, з обмеженістю найважливіших органічних і мінерально-сировинних ресурсів планети. Рослинна біомаса, яка використовується у якості палива, має низку особливостей, що відрізняє її від інших енерго-ресурсів. Найбільш важливою паливно-технологічною характеристикою біомаси, яку використовують як тверде біопаливо, є її теплота згорання, яка суттєво знижується при збільшенні її вологості [1, 6]. Спалювання біомаси підвищеної вологості є недопустимим з точки зору техногенного впливу на довкілля і тому обов'язковою умовою використання біомаси в енергетичних цілях є доведення їх вологості до значення, яке забезпечує найбільш повне згорання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Теоретичні засади та практичні механізми ресурсо- та енергозбереження за рахунок використання біомаси рослинного походження знайшли відображення в працях вітчизняних і зарубіжних дослідників, серед яких: А. Долінський, Г. Гелетуха, В. Мироненко, Г. Голуб, Равн Е. та ін. [1, 2, 3, 4, 5].

Незважаючи на накопичені наукові здобутки та значний практичний досвід у сфері виготовлення паливних брикетів із рослинної біомаси, перспективним напрямком досліджень для України є енергозаощадження при виробництві місцевого палива, що розглядається як вирішення не тільки енергетичних та економічних проблем, а й екологічних. Подальшої активізації потребують дослідження по вирішенню актуальних завдань – зниження затрат на виготовлення паливних брикетів із рослинної біомаси.

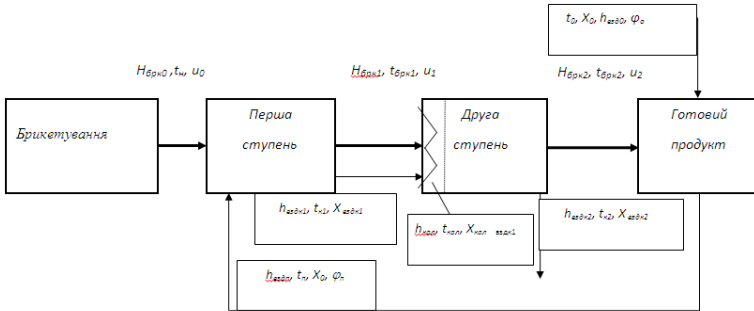
На основі аналізу літературних джерел [1, 2, 3, 4] з проблем спалювання рослинної біомаси, тепломасообміну, сушці та попередніх експериментальних дослідженнях були зроблені розрахунки й узагальнення.

**Виділення невирішених раніше складових загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Ефективне використання біомаси в якості біопалива досягається за рахунок додаткових вкладень, пов'язаних із доведення її вологості до стандартного значення, що підвищує вартість палива, і, відповідно, собівартість виробленої енергії. Це пов'язано з досить складною і енергоємною технологією сушки. Тому, для зменшення енергозатрат на виготовлення таких паливних брикетів пропонується максимальне використання власного тепла брикетів, що утворюється при їх виготовленні на ударно-механічному пресі.

**Формування цілей статті.** Метою досліджень є розробка схеми та розрахунок процесу сушки паливних брикетів, виготовлених

на ударно-механічному пресі з максимальним використанням їх власного тепла.

**Основна частина.** Основний принцип запропонованої схеми процесу сушки може бути представлений у наступному вигляді (рис. 1).



**Рис. 1 – Схема процесу сушки паливних брикетів  
Розрахунок першої ступені апарату**

Об'єктом поетапних розрахунків є визначення середньої температури теплоносія на виході брикетів із першої ступені та маси води, що випарюється. При розрахунках приймається, що енергія брикетів, яка виділяється в ході зниження їх температури, витрачається на підігрів повітря, яке його омиває і на випаровування вологи брикету.

Поверхня тепловіддачі одиночного брикету  $F$ ,  $m^2$  визначається як

$$F = \pi \cdot d_{бр} \cdot L_{бр} + \pi \cdot d_{бр}^2 / 2, \quad (1)$$

де  $L_{бр}$  – довжина брикету, м.

Сушка ведеться на рухомому кулачковому транспортері.

Рівняння передачі тепла  $Q$ , кДж одиночним брикетом

$$Q = F \cdot \alpha \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau, \quad (2)$$

де  $\tau$  – експериментальний час перебування брикету в зоні первинної сушки, с;

$\Delta t_{cp}$  – середня різниця температур між потоком повітря і стінкою брикету, К

$$\Delta t_{cp} = [(t_{c1} - t_0) + (t_{c1} - t_{k1})] / 2, \quad (3)$$

де  $t_{c1}$  – середня температура поверхні брикетів на 1 ступені апарату, °С;

$t_0$  – температура повітря на вході в першу ступень апарату, °С;

$t_{k1}$  – температура повітря, що підлягає визначенню на виході з I ступені апарату, °С.

Рівняння розрахунку кількості тепла отриманого потоком повітря за час  $\tau$  від одного брикету на першій ступені апарату має вигляд, кДж

$$Q = M_{\text{взд}} \cdot C_{\text{взд}} (t_{k1} - t_0). \quad (4)$$

Маса повітря, що підігрівається омиваючи один брикет на першій ступені апарату за час  $\tau$ , кг

$$M_{\text{взд}} = s \cdot w \cdot \rho_{\text{взд}} \cdot \tau, \quad (5)$$

де  $s$  – площа перетину потоку повітря при обтіканні брикету в вузькому місці, м<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{взд}}$  – щільність повітря підігрітого за рахунок охолодження брикетів °С, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – швидкість потоку повітря в вузькому місці між брикетами, м/с.

Можна записати

$$Q = Q_{\text{пвзд}}, \quad (6)$$

де  $Q_{\text{пвзд}}$  – кількість тепла, що витрачається на підігрів конвекцією зовнішнього потоку повітря за час проходження брикету через першу ступень апарату, кДж;

$$Q_{\text{пвзд}} = \Delta H_{\text{бр}} - H_{\text{пвод}} \quad (7)$$

де  $\Delta H_{\text{бр}}$  – загальна кількість тепла, віддана брикетом на випаровування внутрішньої води і на підігрів конвекцією зовнішнього повітряного потоку за час перебування брикету на першій ступені апарату, кДж.

$$\Delta H_{\text{бр}} = H_{\text{брк0}} - H_{\text{брк1}}. \quad (8)$$

Знаходимо ентальпію підсушеного брикету на виході з першої ступені апарату, кДж

$$H_{\text{брк1}} = [m_{\text{сс}} \cdot C_{\text{сс}} + m_{\text{вод1}} \cdot C_{\text{вж}} + m_{\text{взд1}} \cdot C_{\text{взд1}}] \cdot t_{\text{брк1}}, \quad (9)$$

де  $t_{\text{брк1}}$  – середня температура брикету після першої ступені апарату.

Ентальпія парів води, що дифундують з брикету в повітряний потік, кДж

$$H_{\text{пвод}} = h_{\text{тс}} \cdot d_{\text{мв1}}, \quad (10)$$

де  $h_c$  – питома ентальпія парів води, що дифундує з підсушеного брикету при температурі стінки брикету після першої ступені апарату, кДж/кг;

$d_{мв1}$  – маса води, що видаляється з брикету на першій ступені апарату за рахунок теплової енергії, яка вноситься гарячим брикетом, кг.

Поряд із випаровуванням води за рахунок тепла, внесеного брикетом, певне випаровування здійснюється за рахунок потенційної енергії, що вноситься повітрям, яке стискається у вентиляторі. У шарі брикетів потік повітря здійснює роботу тертя, в результаті чого виділяється певна кількість тепла, яке витрачається на випаровування вологи. Проявляється дія додаткового джерела тепла. Загальну потужність додаткового джерела енергії, яка вноситься повітрям в апарат, рекомендується розраховувати по установочній потужності електродвигуна з поправкою на ККД двигуна і втратою теплової енергії через корпус вентилятора в навколишнє середовище.

Теплова потужність вентилятора  $Q_{ед}$ , кВт, передана потоку повітря визначається як

$$Q_{ед} = 0,8 \cdot W_{ед}, \quad (11)$$

де  $W_{ед}$  – установочна потужності електродвигуна вентилятора, кВт;

0,8 – коефіцієнт, що враховує ефективність роботи електродвигуна і втрати тепла через корпус вентилятора в атмосферу.

Перетворення потенційної енергії потоку в теплоту залежить від зміни швидкості потоку повітря в квадраті, тому приймаємо, що на першій ступені апарату виділяється у формі тепла тільки 70 % загальної енергії потоку.

Теплова потужність додаткового джерела тепла  $Q_{пв1}$ , кДж/с, що діє в брикеті за рахунок зміни параметрів потоку повітря і яка впливає на процес випаровування,

$$Q_{пв1} = 0,7 \cdot Q_{ед}. \quad (12)$$

Додаткова кількість енергії  $q_{пвбр}$ , кДж, що підводиться кожному брикету за рахунок зміни параметрів потоку повітря

$$q_{пвбр} = Q_{пв1} \cdot \tau/n, \quad (13)$$

де  $n$  – кількість брикетів, що висушуються за 1 годину.

Оцінка кількості вологи  $d_{мпв1}$ , яка, що видаляється з брикету за рахунок дії додаткового джерела теплоти проводиться за співвідношенням

$$d_{мпв1} = q_{пвбр} / h_c, \quad (14)$$

Загальна кількість вологи, що видаляється з брикету на 1 ступені апарату, кг

$$d_{\text{мобц1}} = d_{\text{мв1}} + d_{\text{мпв1}}. \quad (15)$$

Підвищення вологовмісту повітря  $\Delta x_1$  на виході з першої ступені апарату, кг/кг сухого повітря

$$\Delta x_1 = d_{\text{мобц1}} / M_{\text{взд}}. \quad (16)$$

Вологовміст повітря  $X_{\text{вздк1}}$  на виході з першої ступені апарату, кг/кг

$$X_{\text{вздк1}} = X + \Delta x_1. \quad (17)$$

Питома ентальпія вологого повітря на виході з 1 ступені апарату, кДж/кг

$$h_{\text{вздк1}} = (C_{\text{взд}} + X_{\text{вздк1}} \cdot C_{\text{пв}}) \cdot t_{\text{к1}} + r_{\text{к1}} \cdot X_{\text{вздк1}}, \quad (18)$$

де  $r_{\text{к1}}$  – питома теплота пароутворення при кінцевій температурі потоку, кДж/кг.

Характеристикам вологого повітря на виході із першої ступені відповідає точка С (рис. 2).

Розрахунок другої ступені апарату

Середній вміст води в брикетах  $m_{\text{вод1}}$  на вході в другу ступень апарату, кг

$$m_{\text{вод1}} = m_{\text{вод}} - d_{\text{мобц1}}. \quad (19)$$

Кількість води  $\Delta m_{\text{вод2}}$ , яку необхідно видалити з кожного брикету на другій ступені апарату

$$\Delta m_{\text{вод2}} = m_{\text{вод1}} - m_{\text{водк2}}. \quad (20)$$

Підвищення вологовмісту повітря, яке виходить з другої ступені при русі брикетів в один шар

$$\Delta x_2 = \Delta m_{\text{вод2}} / M_{\text{взд}}. \quad (21)$$

Кінцевий вологовміст повітря на виході з другої ступені апарату, кг/кг

$$X_{\text{вздк2}} = X_{\text{вздк1}} + \Delta x_2. \quad (22)$$

Згідно експериментальних даних задасмоь температурою брикетів на вході в другу ступень та температурою потоку повітря.

Попередні розрахунки показали, що при максимальній вологості брикетів 20% в системі недостатньо власної теплової енергії для висушування брикетів до проектних 14%. Тому перед подачею повітря з першої ступені апарату на другу вводять додатковий його підігрів від зовнішнього джерела, наприклад в електрокалорифері. При вологості брикетів нижче максимальної визначається необхідна потужність електрокалорифера, а при необхідності, він може взагалі бути відключеним.

Таким чином, для процесу досушування брикетів на другій ступені витрачається тепло від трьох джерел. Перше джерело тепла функціонує за рахунок охолодження брикетів (від залишкового тепла брикетів після 1 ступені). Друге джерело тепла проявляється за рахунок підведення тепла брикетам від підігрітого повітря. Третє джерело тепла є наслідком деградації механічної енергії потоком повітря, яка через роботу тертя перетворюється в теплову енергію. Це додаткове джерело тепла порівняно малопотужне.

Щоб забезпечити на другій ступені апарату спрямованість вектора потоку тепла від повітря до брикетів, прийнято, що кінцева температура відпрацьованого повітря буде вище кінцевої температури брикетів на 3 градуси.

Після прийняття зазначених припущень проводимо розрахунки, які дозволять визначити температуру, до якої необхідно підігрівати повітря після 1 ступені перед подачею на 2 ступень апарату (точка D рис. 2).

Питома ентальпія вологого повітря на виході з другої ступені апарату, кДж/кг

$$h_{\text{вздк2}} = (C_{\text{взд}} + X_{\text{вздк2}} \cdot C_{\text{пв}}) \cdot t_{\text{к2}} + r_{\text{к2}} \cdot X_{\text{вздк2}}, \quad (23)$$

де  $t_{\text{к2}}$  – температура відпрацьованого повітря на виході з 2 ступені апарату,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$r_{\text{к2}}$  – питома теплота пароутворення при відповідній температурі ( $^{\circ}\text{C}$ ) брикетів на виході з другої ступені, кДж/кг.

Ентальпія висушеного брикету при відповідній температурі ( $^{\circ}\text{C}$ ) брикетів на виході з 2 ступені апарату, кДж

$$H_{\text{брк2}} = [m_{\text{сс}} \cdot C_{\text{сс}} + m_{\text{вод2}} \cdot C_{\text{вж}} + m_{\text{взд2}} \cdot C_{\text{взд}}] \cdot t_{\text{брк2}}. \quad (24)$$

Складаємо тепловий баланс для процесу сушки одного брикету на 2 ступені апарату. Прихід тепла

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{вздк1}} + Q_{\text{брк1}} + Q_{\text{пвм2}} + Q_{\text{подог}}, \quad (25)$$

де  $Q_{вздк1}$  – теплота, яка надходить з повітрям, що омиває брикет на виході з 1 ступені апарату, кДж

$$Q_{вздк1} = M_{взд} \cdot h_{вздк1}, \quad (26)$$

де  $Q_{брк1}$  – теплота, що надходить з брикетом з 1 ступені при відповідній його температурі на виході з 1 ступені ( $^{\circ}C$ ), кДж

$$Q_{брк1} = H_{брк1}, \quad (27)$$

де  $Q_{пвм2}$  – теплота перетворення механічної енергії потоку повітря в теплову енергію на 2 ступені апарату

$$Q_{пвм2} = Q_{пв2} \cdot \tau / 120, \quad (28)$$

де  $Q_{подог}$  – теплота, яку необхідно підвести від зовнішніх підігрівачів повітрю перед подачею його на 2 ступень апарату для реалізації процесу досушки одиночного брикету, кДж;

$\tau$  – експериментальний час перебування брикету в зоні вторинної сушки (рівний часу перебування в зоні первинної сушки), с;  
Витрати тепла

$$Q_{расх} = Q_{вздк2} + Q_{брк2}, \quad (29)$$

де  $Q_{вздк2}$  – тепло, що виводиться з 2 ступені апарату з відпрацьованим повітрям, кДж

$$Q_{вздк2} = M_{взд} \cdot h_{вздк2}, \quad (30)$$

де  $Q_{брк2}$  – тепло виведене сухими брикетами з 2 ступені апарату при відповідній температурі брикетів,  $^{\circ}C$

$$Q_{брк2} = H_{брк2}. \quad (31)$$

Визначаємо питому ентальпію підігрітого повітря на вході в 2 ступень апарату

$$h_{вздн2} = Q_{вздк2} / M_{взд}. \quad (32)$$

Розрахунок питомої ентальпії повітря після підігрівача, кДж/кг

$$h_{кал} = (C_{взд} + X_{вздк1} \cdot C_{пв}) \cdot t_{кал} + \Gamma_{н2} \cdot X_{кал}, \quad (33)$$

де  $t_{кал}$  – температура підігрітого повітря на вході в другу ступень апарату,  $^{\circ}C$ ;

$\Gamma_{н2}$  – питома теплота пароутворення при  $t_{кал}$ , кДж/кг;

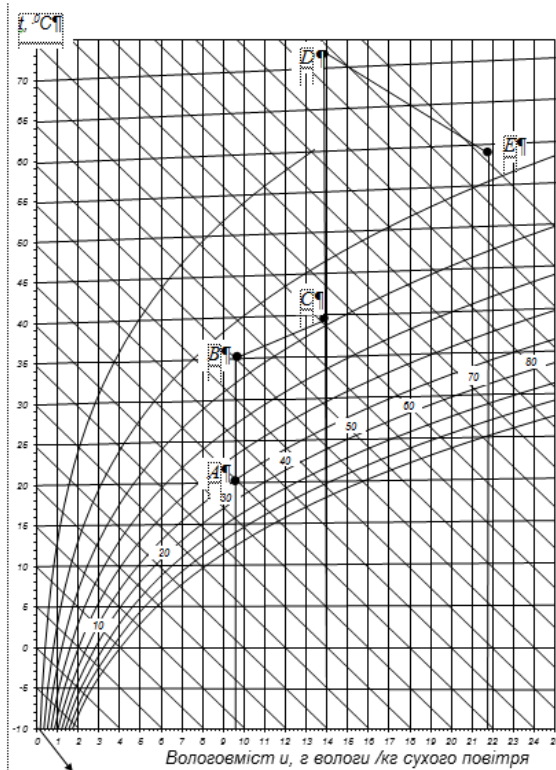
$X_{кал} = X_{вздк1}$  – вологовміст повітря  $X_{вздк1}$  на виході з першої ступені апарату.

Визначення загальної потужності додаткового нагрівача, кВт

$$W_{\text{под}} = Q_{\text{подог}} \cdot n/3600, \quad (34)$$

де  $n$  – число брикетів, що висушуються за 1 годину.

У результаті розрахунків при максимально можливій вхідній вологості брикетів 20 % для досягнення вихідної вологості 14%, яка забезпечує ефективність спалювання та довготривале зберігання брикетів було визначено, що на виході з першої ступені сушки та охолодження температура брикетів буде становити 60 °С, вологість 16%.



**Рис. 2. Розрахунок сушильного агента на різних стадіях сушки брикетів графо-аналітичним методом**

Для забезпечення досушування брикетів була установлена необхідність підігріву повітря на вході в другу ступень до 73 °С. Установлена потужність підігрівача (електрокалорифера) 2,6 кВт, при

фактичній продуктивності преса 90 кг/год. За рахунок цього забезпечується досушування брикетів до необхідної вологості – 14%, при цьому їх температура на виході із другої ступені становитиме 55 °С, а температура повітря, яке залишає апарат буде становити 58 °С (точка Е рис. 2).

**Висновки.** Запропонована схема та проведення розрахунок процесу сушки паливних брикетів із біомаси, виготовлених на ударно-механічному пресі із максимальним використанням їх власного тепла, дає можливість знизити витрати на технологічний процес виробництва таких паливних брикетів, знизити їх собівартість, спалювати брикети з оптимальною вологістю, що буде сприяти збільшенню ККД установок для спалювання брикетів і, відповідно, зменшенню шкідливих викидів в атмосферу.

Ці дослідження можуть бути використанні при виготовленні паливних брикетів із біомаси підвищеної вологості.

## Література

1. Голуб Г.А. Теплота згоряння та умови спалювання соломи / Г.А. Голуб, В.О. Лук'янець, С.В. Субота // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2009. – Вип. 134, ч. 2. – С. 275–278.

2. Долінський А.А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики / А.А. Долінський // Вісник НАН України. – 2006. – № 2. – С. 24–32.

3. Гелетуа Г.Г. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома / Г.Г. Гелетуа, Т.А. Железна, О.І. Дроздова // Промышленная теплотехника. – 2013. – № 3. – С. 56–63.

4. Мироненко В.Г. Тверде біопаливо в теплозабезпеченні села / В.Г. Мироненко, В.О. Глотова, А.В. Філатова // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 158. – С. 90–98.

5. Применение энергии биомассы для отопления и горячего водоснабжения в Республике Беларусь / автор: Джон Вос; Программа развития ООН, Глобальный Экологический фонд, Проект Правительства Республики Беларусь [Электронный ресурс] // ЭСКО: Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2006. – № 2. – Режим доступа: [http://esco-ecosys.narod.ru/2006\\_2/art92.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2006_2/art92.htm). – Загл. с экрана.

6. Мальтри В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Пётке, Б. Шнайдер; пер. с нем. В.М. Комиссаров, Ю.Л. Фрегер; под ред. В.Г. Евдокимова. – М.: Машиностроени