

Семірненко Юрій Іванович.

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-4230-4614  
email usemirnenko@gmail.com

Семірненко Світлана Леонідівна

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-9304-3637  
email semirnenkosv@gmail.com

*Запропоновано удосконалення процесу сушки паливних брикетів із соломи з метою подальшого використання їх в якості місцевого палива, що розглядається як вирішення екологічних, енергетичних та економічних проблем. Приведено розрахунок процесу сушки паливних брикетів із застосуванням їх власного тепла, яке утворилося під час виготовлення, що дає можливість знизити витрати на технологічний процес виробництва паливних брикетів, знизити їх собівартість, збільшити ККД установок для спалювання брикетів та зменшити шкідливі викиди.*

**Ключові слова:** солома, брикети, біомаса, сушка, спалювання, ущільнення, баланс, теплота, волога, ентальпія, теплосмісткість, повітря.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2019.3.8>

**Постановка проблеми.** Солома, яка використовується для виготовлення паливних брикетів може мати вологість від 6 до 60%. Це, перш за все, залежить від умов її зберігання, вологості повітря та ін. факторів. Тому обов'язковою умовою використання соломи в енергетичних цілях є процес її сушки. Тобто, доведення вологості до значення, яке забезпечує найбільш повне згорання як самої соломи, так і виготовлених із неї брикетів.

Використовувати солому як паливо досить доцільно – з відносно дешевої сировини, яка залишається після збирання зернових, отримуємо екологічно чисте паливо. Однак, слід зазначити, що солома, як і кожен вид палива, має ряд недоліків, серед яких досить висока вологість і різний фракційний склад. Спалювання біомаси з високою вологістю суперечить ідеї використання біомаси як екологічно дружнього палива взамін шкідливого для навколишнього середовища вихлопного палива і більш схоже на утилізацію палива як відходів, ніж на ефективне використання палива для отримання теплової енергії. Шкідливі викиди при неповному спалюванні біомаси великі і згубно впливають на навколишнє середовище, людей, рослинний і тваринний світ. З економічної точки зору мають місце низький ККД і великі витрати палива. Отже, спалювання соломи підвищеної вологості є недопустимим з точки зору техногенного впливу на довкілля і тому обов'язковою умовою використання біомаси в енергетичних цілях є доведення її вологості до значення, яке забезпечує найбільш повне згорання [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Незважаючи на накопичені наукові здобутки та значний практичний досвід у сфері технології утилізації біомаси, які знайшли відображення в працях вітчизняних та зарубіжних дослідників, серед яких В. Мальтри, А. Долінський, Г. Гелетуха, Т. Железна, Г. Голуб та ін. [1, 2, 3, 4], перспективним напрямком досліджень для України є використання соломи в якості місцевого палива, що розглядається як вирішення екологічних, енергетичних та економічних проблем.

Аналіз зарубіжних та вітчизняних джерел дозволяє стверджувати, що найенергоємнішим етапом технологічного

процесу виробництва брикетів із рослинної біомаси є попередня сушка сировини, яка займає 34,2% загальних енерговитрат. Крім того, сушка подрібненої біомаси є пожежонебезпечною ділянкою технологічного процесу [5, 6].

Типова технологія виготовлення брикетів, що застосовується в нашій країні, передбачає сушку солом'яної біомаси після її подрібнення і подальше брикетування. При охолодженні брикетів йде процес безповоротної утилізації відібраного від брикетів тепла [4].

Запропонована в працях В. Войтова, І. Вороновського, В. Бунецького [6, 7] технологія виготовлення паливних брикетів без сушки солом'яної біомаси за рахунок застосування тонкого її помелу до 100 – 50 мкм призводить до збільшення витрат енергії на подрібнення.

**Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми.** Із аналізу наукових досліджень і огляду технічних засобів, які існують для охолодження і сушки брикетів встановлено, що на теперішній час не розроблені в достатній мірі способи і режими охолодження і сушки паливних брикетів із біомаси, які дозволили б створити установку, котра виконує не тільки інтенсивне охолодження, але й їх інтенсивну сушку за рахунок власного тепла брикетів.

**Формування цілей статті.** Метою досліджень є підвищення ефективності процесу виготовлення паливних брикетів із солом'яної біомаси за рахунок максимального використання їх власного тепла, яке утворюється при виготовленні брикетів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нами досліджувалися брикети типу **Nestro**, які виготовлялися на ударно-механічному пресі.

При технологічному процесі брикетування соломи, як правило, використовується сировина із вологістю до 14%. Проте, у більшості випадків дану вологість соломи отримують при виконанні додаткової операції сушки. Для забезпечення технологічного процесу сушки використовують штучну сушку, тобто для сушки використовується тепловий агент із певними параметрами (температура, вологість та ін.). Для забезпе-

чення заданих параметрів теплового агента необхідне спалювання одного із видів палива, у переважній більшості традиційного (непоновлювального), спалювання якого завдає значної шкоди навколишньому середовищу, а також здорожує технологічний процес виготовлення паливних брикетів із соломи.

При виготовленні брикетів їх температура може сягати більше 100 °С, що вище температури розм'якшення лігніну. Для запобігання злипанню брикетів їх необхідно охолоджувати, що потребує додаткових витрат.

Більш широке використання сільгоспвиробниками такого поновлювального місцевого палива як солома призведе до використання її у різних модифікаціях, в тому числі і з підвищеною вологістю з метою скорочення витрат на сушку.

На основі проведених попередніх розрахунків була розроблена методика експериментальних досліджень з метою підтвердження можливості виготовлення паливних брикетів з підвищеною вологістю соломи та охолодження і сушки брикетів за рахунок використання тепла, що утворилося під час їх виготовлення. В результаті забезпечується висушування брикетів до необхідної вологості, що й зменшить витрати на їх виготовлення, а головне – скоротить кількість шкідливих викидів при спалюванні соломи брикетів.

З метою детальнішого аналізу процесу ущільнення важливе значення має розгляд балансів вологи і теплоти при брикетуванні соломи [8]. Загальний баланс вологи при брикетуванні запишеться у вигляді рівняння

$$V_c = V_b + V_n + V_{ox}, \quad (1)$$

де  $V_c$  – кількість вологи у соломі, що потрапляє на пресування, кг;

$V_b$  – кількість вологи у кінцевому продукті (брикеті), кг;

$V_n$  – втрати вологи від нагріву в процесі пресування, кг;

$V_{ox}$  – втрати вологи при охолодженні брикетів, кг.

Ліва частина рівняння представляє кількість вологи в сировині, що потрапляє на пресування, а права – розподіл вологи після пресування (в брикеті).

Із загального балансу вологи кількість, яка буде в утвореному брикеті

$$V_b = V_c - V_n - V_{ox}. \quad (2)$$

Загальний баланс теплоти при брикетуванні соломи запишеться у вигляді

$$Q_t - Q_n = Q_b + Q_{ox}, \quad (3)$$

де  $Q_t$  – кількість теплоти, що виділяється при пресуванні, Дж;

$Q_n$  – втрати теплоти в процесі пресування, Дж;

$Q_b$  – кількість теплоти, що виноситься утвореними брикетами, Дж;

$Q_{ox}$  – кількість тепла, що втрачається при переміщенні брикетів з песу на сушильну установку, Дж.

Різниця в лівій частині рівняння  $Q_t - Q_n$  представляє кількість теплоти, яка йде на нагрів соломи в процесі пресування, а права частина рівняння представляє розподіл тепла після пресування. Співвідношення, що складають баланс вологи і тепла повинні бути оптимальними, оскільки вони дають суттєвий вплив на якісні, енергетичні та економічні показники процесів брикетування соломи.

Дослідження процесів тепло- та масообміну вологих матеріалів з зовнішнім середовищем являє собою складну теплофізичну задачу.

На основі аналізу літературних джерел по тепломасообміну [9, 10], сушці [11, 12, 13] та попередньо проведених експериментальних досліджень були зроблені наступні розрахунки і узагальнення.

Процес охолодження та сушки можна розділити на декілька етапів.

Гарячі брикети з преса потрапляють на апарат для охолодження та сушки, який розділений на дві ступені.

На першій ступені брикети сушаться за рахунок отриманого в результаті пресування тепла при обдуванні їх повітряним потоком, який створює вентилятор. Для підвищення ефективності сушки брикетів, забір повітря вентилятором виконується через шар гарячих брикетів із вузла завантаження паливних брикетів. На першій ступені крім сушки йде інтенсивне охолодження брикетів.

На другій ступені брикети сушаться за рахунок залишкового тепла брикетів та повітряного потоку, який направляється з першої ступені. При високій вологості брикетів підвищення температури повітряного потоку для забезпечення висушування до оптимальної вологості в другій зоні забезпечується електрокалорифером (при потребі). Висушені брикети поступають в вузол завантаження паливних брикетів, де йде їх інтенсивне охолодження за рахунок проходження потоку атмосферного повітря.

Нами були попередньо розраховані характеристики типового сирого брикету: відносна вологість  $W$ ; вологовміст  $u$ ; щільність брикетів  $\beta_{сбр}$ ; маса типового сирого брикету  $M_{сбр}$ ; об'єм займаний скелетом сухої соломи  $V_{сс}$ ; вільна вода  $V_{вод}$ , повітря  $V_{взд}$  в брикеті; маса сухої соломи  $m_{сс}$ , вільної води  $m_{вод}$  та повітря  $m_{взд}$  в сирому брикеті.

Приймаємо, що вихідне повітря відповідає характеристикам атмосферного повітря: середня температура  $t_0=20,3^\circ\text{C}$ , відносна вологість  $\varphi = 65\%$ .

Знаходимо питому ентальпію вхідного вологого повітря при прийнятих умовах, кДж/кг

$$h_{взд0} = (C_{взд} + X \cdot C_{пв}) \cdot t_0 + r_0 \cdot X, \quad (4)$$

де  $C_{взд}$  – теплоємність повітря, приймаємо 1,01 кДж/кг·К;

$C_{пв}$  – теплоємність парів води, приймаємо 1,97 кДж/кг·К;

$r_0$  – питома теплота пароутворення при 20,3°С, приймаємо 2448,2 кДж/кг;

$X$  – вологовміст вихідного атмосферного повітря 0,00954 кг/кг

$$X = 0,622 \cdot \varphi \cdot P_{нвл} / (P_{атм} - \varphi \cdot P_{нвл}), \quad (5)$$

де  $P_{атм}$  – атмосферний тиск, Па;

$P_{нвл}$  – тиск насичених парів води при 20,3°С, Па.

Попередніми експериментальними дослідженнями встановлено, що температура брикетів, які виходять із пресу становить 95°С.

Визначаємо ентальпію свіжоприготованого брикету при 95°С, кДж

$$H_{брк0} = H_{ссн} + H_{воджн} + H_{вздн}, \quad (6)$$

де  $H_{ссн}$ ,  $H_{воджн}$ ,  $H_{вздн}$  – відповідно ентальпія сухої соломи, вільної води, вологого повітря в сирому брикеті, кДж.

Так як атмосферне повітря перед подачею в апарат охолоджує брикети, які кулачковим транспортером направляються після сушки та охолодження в накопичувач, (тару) то воно підігрівається до 35°С, але зберігає вологовміст атмосферного повітря.

Питома ентальпія підігрітого до 35°C вхідного атмосферного повітря, кДж/кг

$$h_{вздп} = (C_{взд} + X \cdot C_{пв}) \cdot t_n + r_n \cdot X, \quad (7)$$

де  $r_n$  – питома теплота пароутворення при 35°C, приймаємо 2414,3 кДж/кг.

Оцінюємо відносну вологість повітря  $\varphi_n$  підігрітого до 35°C через вологовміст вхідного атмосферного повітря  $X$ . Відносна вологість повітря  $\varphi_n$  знаходиться в межах  $0,272 < \varphi_n < 0,273$ .

Таким чином, підігрів атмосферного повітря до 35°C істотно знижує відносну вологість повітря, що підвищує рушійну силу перенесення парів води з поверхні брикету в повітря.

Розрахунок характеристик висушеного брикету. При проведенні розрахунків масою повітря в брикеті нехтуємо.

У висушеному брикеті після 2 ступені апарату міститься вільної води, кг

$$m_{вод2} = u_k \cdot m_{сс}, \quad (8)$$

де  $u_k$  – вологовміст, або абсолютна вологість висушеного брикету;

$m_{сс}$  – маса сухої соломи в сирому брикеті, кг.

Необхідно при сушці видалити з брикету води, кг

$$\Delta M_{вод} = m_{вод} - m_{вод2}, \quad (9)$$

де  $m_{вод}$  – маса вільної води в сирому брикеті, кг.

Експериментально визначено, що після сушіння в двох ступенях апарату брикет має середню температуру  $t_{к2} = 55^\circ\text{C}$ .

Розраховуємо ентальпію кінцевого брикету.

Ентальпія сухої соломи  $H_{сс}$  в брикеті з кінцевою вологістю, кДж

$$H_{сс0} = m_{сс} \cdot C_{сс} \cdot t_{к2}, \quad (10)$$

де  $m_{сс}$  – маса сухої соломи в брикеті, кг;

$C_{сс}$  – теплоємність сухої соломи, кДж/кг·К;

$t_{к2}$  – уточнена кінцева температура готового брикету після 2 ступені апарату, °С

Ентальпія вільної води  $H_{водж2}$  у висушеному брикеті, кДж

$$H_{водж2} = M_{водж2} \cdot C_{вж} \cdot t_{к2}, \quad (11)$$

де  $M_{водж2}$  – маса вільної води у висушеному брикеті, кг;

$C_{вж}$  – теплоємність рідкої води, кДж/кг·К.

Питома ентальпія вологого повітря, що знаходиться в порах висушеного брикету, кДж/кг

$$h_{вздк2} = (C_{взд} + X_{вздк2} \cdot C_{пв}) \cdot t_{к2} + r_{к2} \cdot X_{вздк2}, \quad (12)$$

де  $C_{взд}$  – теплоємність повітря, кДж/кг·К;

$C_{пв}$  – теплоємність пари води, кДж/кг·К;

$X_{вздк2}$  – вологовміст повітря в порах висушеного брикету, кг/кг

$$X_{вздк2} = 0,622 \cdot \varphi_{вздк2} \cdot P_{вздк2} / (P_{атм} - \varphi_{вздк2} \cdot P_{вздк2}), \quad (13)$$

де  $P_{вздк2}$  – тиск насиченої водяної пари в повітрі пор висушеного брикету при 55°C, Па;

$r_{к2}$  – питома теплота пароутворення при 55°C, (2361,4) кДж/кг;

$\varphi_{вздк2}$  – відносна вологість повітря в порах висушеного брикету після другої ступені апарату, дол. од.

Нехтуємо незначним збільшенням маси повітря в порах за рахунок видалення води і вважаємо, що маса повітря в порах ідентична як перед сушінням так і після сушіння.

Ентальпія вологого повітря у висушеному брикеті, кДж

$$H_{вздк2} = m_{взд} \cdot h_{вздк2}, \quad (14)$$

де  $m_{взд}$  – маса сухого повітря в порах висушеного брикету, кг;

$h_{взд0}$  – питома ентальпія вологого повітря у висушеному брикеті при 55°C, кДж/кг.

Повна ентальпія висушеного брикету, кДж

$$H_{брик2} = H_{сск2} + H_{водж2} + H_{вздк2}. \quad (15)$$

Зміна ентальпії брикету в тепломасообмінному апараті, кДж

$$\Delta H_{бр} = H_{брик0} - H_{брик2}. \quad (16)$$

Для оцінки інтенсивності теплообміну приймемо, що умови теплообміну відповідають теплообміну при зовнішньому обтіканні одиночного циліндричного тіла.

Конструктивно тепломасообмінний апарат складається з двох ступенів однакових по довжині. На першій ступені свіжоприготовані брикети обдуваються вихідним повітрям з температурою 35°C. На другій ступені апарату частково підсушені брикети обдуваються відпрацьованим повітрям з першої ступені після підвищення його температури за рахунок зовнішнього підведення тепла.

Визначаємо вільний перетин прохідних щілин на першій ступені апарату.

Розрахункова кількість прохідних щілин  $N_{щ}$  на першій ступені визначається як

$$N_{щ} = L_a / (d_{бр} + b_{щ}), \quad (17)$$

де  $L_a$  – довжина каналу підводу повітря при врахуванні повороту потоку повітря, м;

$d_{бр}$  – діаметр брикету, м;

$b_{щ}$  – середня ширина щілини між брикетами, приймаємо  $b_{щ} = r/4$ , м.

Повний прохідний перетин повітряного каналу  $S$  на першій ступені апарату

$$S = N_{щ} \cdot V_a \cdot b_{щ}, \quad (18)$$

де  $V_a$  – ширина каналу підведення повітря при врахуванні повороту потоку повітря.

Число брикетів, які укладаються в 1 ряд на першій ступені (2 м) транспортера

$$N_{бр} = N_{щ}. \quad (19)$$

Розрахункова кількість брикетів, що проходять через машину за годину (по продуктивності апарату)

$$N_r = P_a / M_{сбр}, \quad (20)$$

де  $P_a$  – продуктивність установки по сирим брикетам, кг/год;

$M_{сбр}$  – маса одного типового сирого брикету, кг.

Розрахункова кількість брикетів, що проходять через машину за годину (по часу перебування в апараті)

$$N_r = 3600 / t_{уст} \cdot 2 \cdot N_{бр}, \quad (21)$$

де  $t_{уст}$  – час перебування брикету в апараті.

З метою коректного спрощення розрахунків на першій ступені апарату процес сушіння розглядається як поєднання двох практично незалежних процесів:

- на поверхні брикету, де підтримується температура стінки близько 55°C йде нагрівання потоку повітря конвективним шляхом з відбором частини тепла від брикету;

- усередині гарячого брикету йде випаровування води і дифузія парів води до поверхні теплообміну, так як тиск парів води в теплоносії істотно нижче тиску парів всередині гарячого брикету. На поверхні стінки брикету пари води, що виходять з товщі брикету, змішуються з підігрітим повітрям і виводяться.

Розрахунок конвективного теплообміну між поверхнею брикету і потоком повітря здійснювали, використовуючи прийоми теорії подібності. Враховуючи мале число рядів брикетів на конвеєрі, для визначення середнього по поверхні брикетів коефіцієнта тепловіддачі, використовуємо критеріальне рівняння Жукаускаса, запропоноване для розрахунку теплообміну при омиванні потоком теплоносія одиночного циліндра

$$Nu_{жд} = 0,25 Re_{жд}^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,38} (Pr_{ж} / Pr_{с})^{0,25}, \quad (22)$$

де  $Nu_{жд}$  – число Нуссельта,

$Re_{жд}$  – число Рейнольдса,

$Pr_{ж}$  – число Прандтля.

При розрахунках визначальною швидкістю рекомендовано брати швидкість в самому вузькому перетині потоку, визначальною температурою для вибору фізичних характеристик теплоносія рекомендовано брати температуру потоку.

На першій ступені тепломасообмінного апарату середня температура поверхні брикетів прийнята 55°C, що близько до експериментальних даних.

Виконаний поліваріантний розрахунок умов теплообміну в першому ряду брикетів. При розрахунках варіювали швидкістю потоку повітря, приймаючи її дискретні значення 2, 1, 0,5 і 0,25 м/с. Зазначені швидкості, як показали розрахунки, забезпечували турбулентний режим течії повітря і придатність рівняння Жукаускаса.

Розрахунок числа Рейнольдса виконується за формулою

$$Re_{жд} = w \cdot d_{бр} / \nu_{ж}, \quad (23)$$

де  $w$  – швидкість лінійна потоку повітря при температурі, м/с;

$\nu_{ж}$  – кінематична в'язкість повітря при температурі, м<sup>2</sup>/с.

Значення чисел Рейнольдса для прийнятого інтервалу швидкостей задовольняють вимозі по використанню рівняння Жукаускаса

$$1 \cdot 10^3 < Re_{жд} < 2 \cdot 10^5.$$

Розрахунок числа Нуссельта виконується по рівнянню

$$Nu_{жд} = 0,25 \cdot Re_{жд}^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,38} \cdot (Pr_{ж} / Pr_{с})^{0,25} \quad (24)$$

Розрахунок розмірного коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  вели, виходячи з формули

$$Nu_{жд} = \alpha \cdot d_{бр} / \lambda, \quad (25)$$

при швидкості потоку повітря  $w$ , м/с коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  знаходимо як

$$\alpha = Nu_{жд} \cdot \lambda / d_{бр}. \quad (26)$$

Розрахунок першої ступені апарату. Об'єктом поетапних розрахунків є визначення середньої температури теплоносія на виході з першого ряду брикетів і маси води, що упарюється. 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  $F$ , м<sup>2</sup> визначається як

$$F = \pi \cdot d_{бр} \cdot L_{бр} + \pi \cdot d_{бр}^2 / 2, \quad (27)$$

де  $L_{бр}$  – довжина брикету, м.

Сушка ведеться на рухомому кулачковому транспорті. Охолодження брикетів від 95 до 60°C.

Рівняння передачі тепла  $Q$ , кДж одиночним брикетом потоку повітря

$$Q = F \cdot \alpha \cdot \Delta t_{ср} \cdot \tau, \quad (28)$$

де  $\tau$  – експериментальний час перебування брикету в зоні первинної сушки, 750 с;

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

$$\Delta t_{ср} = [(t_{c1} - t_0) + (t_{c1} - t_{k1})] / 2, \quad (29)$$

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

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

$t_{k1}$  – температура повітря, що підлягає визначенню на виході з 1 ступені апарату, °C.

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

$$Q = M_{взд} \cdot C_{взд} (t_{k1} - t_0). \quad (30)$$

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

$$M_{взд} = s \cdot w \cdot \rho_{взд} \cdot \tau = 1,935 \cdot w, \quad (31)$$

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

$\rho_{взд}$  – щільність повітря при 35°C, кг/м<sup>3</sup>;

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

Можна записати

$$Q = Q_{пвзд}, \quad (32)$$

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

$$Q_{пвзд} = \Delta H_{бр} - H_{пвод} \quad (33)$$

де  $\Delta H_{бр}$  – 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

$$\Delta H_{бр} = H_{брк0} - H_{брк1}. \quad (34)$$

Знаходимо ентальпію підсушеного брикету при 60°C на виході з першої ступені апарату, кДж

$$H_{брк1} = [m_{сц} \cdot C_{сц} + m_{вод1} \cdot C_{вж} + m_{взд1} \cdot C_{взд}] \cdot t_{брк1}, \quad (35)$$

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

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

$$H_{пвод} = h_{тс} \cdot d_{мв1} = 2598,7 \cdot d_{мв1}, \quad (36)$$

де  $h_{тс}$  = 2598,7 – питома ентальпія водяної пари, що дифундує з підсушеного брикету при температурі стінки (55°C), кДж/кг;

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

При швидкості потоку повітря  $w = 2$  м/с і  $\alpha = 20,08 \cdot 10^{-3}$  температура повітря, що підлягала визначенню на виході з 1 ступені апарату  $t_{k1} = 39,31$ °C.

Поряд з випаровуванням води за рахунок тепла, внесенного 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, що вноситься повітрям в апа-

рат, 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

$$Q_{ед} = 0,8 \cdot W_{ед}, \quad (37)$$

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

$$Q_{пв1} = 0,7 \cdot Q_{ед}. \quad (38)$$

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

$$q_{пвбр} = Q_{пв1} \cdot t/120. \quad (39)$$

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

$$d_{мпв1} = q_{пвбр} / 2347,48, \quad (40)$$

де 2347,48 – питома ентальпія водяної пари, що відводиться з поверхні брикету потоком повітря при 55°C, кДж/кг.

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

$$d_{тобщ1} = d_{мпв1} + d_{мпв1}. \quad (41)$$

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

$$\Delta x_1 = d_{тобщ1} / M_{взд}. \quad (42)$$

Вологовміст повітря  $X_{вздк1}$  на виході з першої ступені апарату

$$X_{вздк1} = X + \Delta x_1. \quad (43)$$

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

$$h_{вздк1} = (C_{взд} + X_{вздк1} \cdot C_{пв}) \cdot t_{к1} + r_{к1} \cdot X_{вздк1}, \quad (44)$$

де  $r_{к1}$  – теплота пароутворення при 39,31 °C.

Розрахунок другої ступені апарату. Середній вміст води в брикетах  $m_{вод1}$  на вході в другу ступень апарату, кг

$$m_{вод1} = m_{вод} - d_{тобщ1}. \quad (45)$$

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

$$\Delta m_{вод2} = m_{вод1} - m_{водк2}. \quad (46)$$

Так як підсушка на другій ступені апарату, де брикети охолоджуються, малозначима, то нею можна знехтувати.

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

$$\Delta x_2 = \Delta m_{вод2} / M_{взд}. \quad (47)$$

Кінцевий вологовміст повітря на виході з другої ступені апарату

$$X_{вздк2} = X_{вздк1} + \Delta x_2. \quad (48)$$

На вході в другу ступень середня температура брикетів 60°C, а температура потоку повітря 39,31 °C.

Попередні розрахунки показали, що при максимальній вологості брикетів 20% в системі недостатньо власної теплової енергії для висушування брикетів до проектної величини 14%. Тому перед подачею повітря з першої ступені апарату на другу вводять додатковий його підігрів від зовнішнього джерела, наприклад в електрокалорифері.

Таким чином, для процесу досушування брикетів витрачається тепло від трьох джерел. Перше джерело тепла функціонує за рахунок охолодження брикетів від 60 (від залишкового тепла брикетів після 1 ступені) до 55°C. 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 58°C, що вище кінцевої температури брикетів (55°C) 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.

Питома ентальпія вологого повітря на виході з другої ступені апарату

$$h_{вздк2} = (C_{взд} + X_{вздк2} \cdot C_{пв}) \cdot t_{к2} + r_{к2} \cdot X_{вздк2}, \quad (49)$$

де  $t_{к2}$  – температура відпрацьованого повітря на виході з 2 ступені апарату (58°C),

$r_{к2}$  – питома теплота пароутворення при 55°C, кДж/кг.

Ентальпія висушеного брикету при 55°C на виході з 2 ступені апарату

$$H_{брк2} = [m_{сс} \cdot C_{сс} + m_{вод2} \cdot C_{вж} + m_{взд2} \cdot C_{взд}] \cdot t_{брк2}, \quad (50)$$

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

Прихід тепла

$$Q_{прих} = Q_{вздк1} + Q_{брк1} + Q_{пвм2} + Q_{подог}, \quad (51)$$

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

$$Q_{вздк1} = M_{взд} \cdot h_{вздк1}; \quad (52)$$

$Q_{брк1}$  – теплота, що надходить з брикетом з 1 ступені при 60 °C, кДж

$$Q_{брк1} = H_{брк1}; \quad (53)$$

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

$$Q_{пвм2} = Q_{пв2} \cdot t/120; \quad (54)$$

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

Витрати тепла

$$Q_{расх} = Q_{вздк2} + Q_{брк2}, \quad (55)$$

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

$$Q_{вздк2} = M_{взд} \cdot h_{вздк2}; \quad (56)$$

$Q_{брк2}$  – тепло виведене сухими брикетами з 2 ступені апарату при 55°C

$$Q_{брк2} = H_{брк2}. \quad (57)$$

Визначаємо питому ентальпію підігрітого повітря на виході в 2 ступень апарату

$$h_{вздк2} = Q_{вздк2} / M_{взд} \quad (58)$$

Оцінюємо температуру підігрітого повітря перед подачею його на 2 ступень апарату, °С.

Розрахунок питомої ентальпії повітря після підігрівача

$$h_{\text{вздн2}} = (C_{\text{взд}} + X_{\text{вздк1}} \cdot C_{\text{пв}}) \cdot t_{\text{н2}} + r_{\text{н2}} \cdot X_{\text{вздк1}}, \quad (59)$$

де  $t_{\text{н2}}$  – температура підігрітого повітря на вході в другу ступень апарату;

$r_{\text{н2}}$  – теплота пароутворення при  $t_{\text{н2}}$ .

З достатньою точністю можна вважати, що повітря перед подачею на 2 ступінь потрібно підігріти до 66°С.

Визначення загальної потужності додаткового нагрівача

$$W_{\text{под}} = Q_{\text{подог}} \cdot n / 3600, \quad (60)$$

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

З другої ступені апарату брикети виходять з температурою 55°С і кінцевою вологістю 14% [14].

Дані розрахунків сушильного агента на різних стадіях сушки брикетів відповідають значенням, отриманим графо-аналітичним методом з використанням I – d діаграми (рис. 1).

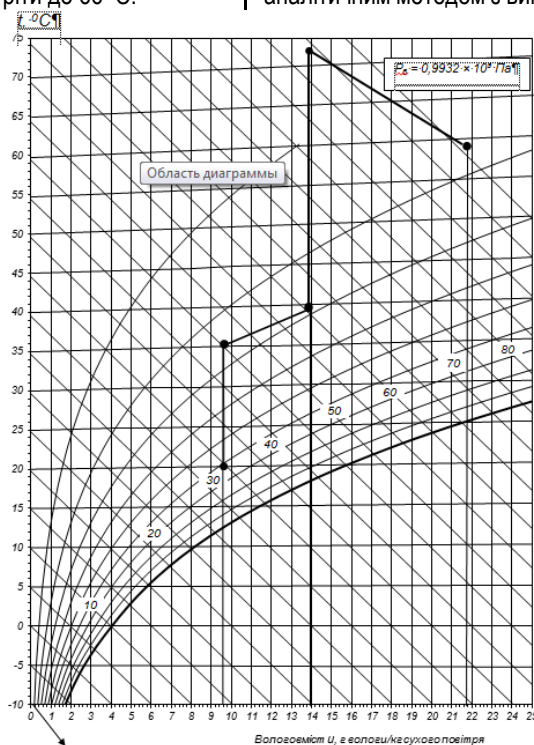


Рисунок 1 – Розрахунок сушильного агента на різних стадіях сушки брикетів графо-аналітичним методом

**Висновки.** Наведений баланс теплоти та вологи при виготовленні паливних брикетів вказує на можливість використання тепла від нагріву при пресуванні брикетів для їх сушки. Визначена ентальпія свіжеприготованого брикету вказує на співмірність ентальпії брикету з необхідною кількістю тепла для видалення частини вологи при сушці. Визначено коефіцієнт тепловіддачі для різних швидкостей повітря. Прове-

дені розрахунки першої та другої ступені апарату дали можливість установити ентальпію, вологовміст повітря та брикетів, їх температуру на виході із кожної ступені та загальну потужність додаткового підігрівача повітря другої ступені. Дані розрахунки сушильного агента на різних стадіях сушки брикетів підтвердились при їх визначенні графо-аналітичним методом з використанням I – d діаграми.

#### Список використаної літератури:

1. Семірненко С. Л., Семірненко Ю. І. Визначення властивостей соломи, призначеної для виготовлення паливних брикетів / Ю.І. Семірненко, С.Л. Семірненко // Вісник СНАУ, серія Механізація та автоматизація виробничих процесів, вип. 3(28), 2016, - С. 148-152.
2. 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.
3. Долінський А.А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики / А.А. Долінський // Вісник НАН України. – 2006. – № 2. – С. 24-32.
4. Гелетуша Г. Г. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома / Г. Г. Гелетуша, Т. А. Железна, О. І. Дроздова // Промышленная теплотехника. – 2013. – № 3. – С.56-63.
5. 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.: Машиностроение, 1979. – 525 с.
6. Войтов В.А., Вороновский И.Б. Пути снижения энергозатрат при производстве твердого топлива в виде брикетов или пеллет / В.А. Войтов, И.Б. Вороновский // Науковий вісник ТДАТУ. – 2012. – Вип. 2, Том 5. – С. 77-83.
7. Бунецький В. О. Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пелет або брикетів / В. О. Бунецький // Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. – 2011. – Вип. 10. – С. 328-340.

8. Равн Э. Биомасса как топливо [Электронный ресурс] / Эрик Равн // Новости ДСЦТ / Датский совет по централизованному теплоснабжению. – Электрон. дані.– 1999. – Режим доступа: <http://www.dbdh.dk/images/uploads/pdf-russian/biomass-as-fuel.pdf>. – Назва з екрану.

9. Калетнік Г.М. Науково обґрунтовані та практичні підходи використання соломи та рослинних решток у сільському господарстві / Г.М. Калетнік, В.М. Булгаков, І.В. Гриник // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2011. – № 9. – С. 62-68.

10. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.

11. 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.: Машиностроение, 1979. - 525 с.

12. Месель-Веселяк В.Я. Ефективність енергетичного самозабезпечення сільського господарства / В.Я. Месель-Веселяк // Економіка АПК. – 2009. – №2. – С.10–14.

13. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.

14. Семірненко С.Л. Розробка процесу сушки паливних брикетів потоком атмосферного повітря з одночасним охолодженням / Журнал інженерних наук. – 2015. – Том 2, № 1. – Е9–Е14.

**Semirnenko Y.I., Sumy National Agrarian University, Ukraine**

**Semirnenko S.L., Sumy National Agrarian University, Ukraine**

**Research of the cooling and drying of fuel briquettes**

*Despite the accumulated scientific achievements and practical experience in the field of biomass utilization technologies, promising research direction for Ukraine is to use straw as local fuel, which is seen as the solution of environmental, energy and economic issues. Further intensification of research need to reduce the costs of manufacturing fuel briquettes from straw biomass and to reduce environmental impact by improving their production technology.*

*The purpose of research is to improve the process of manufacturing fuel pellets from straw biomass by maximizing the use of their own heat.*

*The paper proposed a new scheme of drying straw fuel pellets from biomass using their own heat. Determine the average temperature of the coolant supply and water evaporated at the exit of each level briquette process of drying and humidity of fuel pellets.*

*As a result of settlements with the maximum input moisture briquettes from straw biomass to achieve initial moisture which provides combustion efficiency and long-term storage of briquettes, not the system's own heat to dry the pellets to the original (14%) humidity. Therefore, before the supply of air from the first stage to the second device it introduced additional heating from an external source, such as electric heaters. When moisture briquettes defined below maximum required power electric heater, and if necessary, it can even be disabled. Control is by the value of the finished product moisture (dried bricks). The scheme and the calculation of the drying process of fuel briquettes from maximum use of their own heat makes it possible to reduce the cost of production process of fuel briquettes from straw biomass, reduce their costs, briquettes burn with optimum moisture content, which will help increase the efficiency of combustion plants briquettes and, consequently, reduce harmful emissions.*

*These calculations of the drying agent at different stages of drying the briquettes were confirmed in their determination by graph-analytical method using the I - d diagram.*

**Keywords:** straw, briquettes, biomass, drying, burning, compaction, balance, heat, moisture, enthalpy, heat, air.

Дата надходження до редакції: 09.08.2019