Градиський Ю.О.
Сосєдко М.О.
Лисенко К.О.
Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна
E-mail: gradiskiy@btu.kharkov.ua

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ ПОВЕДІНКИ ШАРУ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС СУШІННЯ

DOI: https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-8
УДК 614.844.2:536.46

Градиський Ю.О. Сосєдко М.О. Лисенко К.О. ***Інформаційний підхід до опису поведінки шару подрібненої деревини під час сушіння***

Анотація. *Використання електротехнологій (озонування агенту сушіння, насичення повітря аероіонами, використання електроосмосу) є додатковим зовнішнім керованим впливом на подрібнену деревину. Це дає можливість більш гнучко управляти процесом сушіння. При досить невисоких енерговитратах, електротехнологія може значно впливати на величину умовної ентропії. Управляючи величиною електротехнологічного впливу, можна управляти реакцією на основний зовнішній вплив – агент сушіння. Встановлено, що для контролю процесу активного вентилювання бажано вимірювати температуру і вологість повітря на вході та виході з шару.*

Для розрахунків сушіння активним вентилюванням був використаний, як найбільш доступний, відомий східчастий метод, в основі якого знаходиться спрощений механізм тепло- і масообміну. Відповідно до принципу максимуму інформації, на підставі результатів моделювання процесу сушіння активним вентилюванням запропоновано збільшувати продуктивність вентилятора в моменти, коли відносна вологість повітря менше 65%. При проведенні моделювання встановлено, що тривалість процесу сушіння при регулюванні продуктивності вентилятора в 4,7 рази менше, ніж при звичайному способі вентилювання. Нерівномірність процесу сушіння залишається на тому ж рівні або знижується до 1%.

Ключові слова: *ентропія; фізичне і математичне моделювання; технічна система; внутрішня енергія; продуктивність вентилятора.*

Gradysky Y.O., Sosiedko M.O., Lysenko K.O. ***An information-based approach to describing the behavior of a layer of shredded wood during drying***

Abstract. *The use of electrical technologies (ozonation of the drying agent, saturation of the air with air ions, use of electro-osmosis) is an additional external controlled effect on the chopped wood. This makes it possible to control the drying process more flexibly. With fairly low energy consumption, electrical technology can significantly affect the value of conditional entropy. By controlling the magnitude of the electrical technology influence, it is possible to control the reaction to the main external influence - the drying agent.*

The analysis of the behavior of shredded wood, its reaction to external influences allows us to say that those periods of external influence when the reaction is in the phase of preventive inhibition are more effective for its drying. It is in this state that the shredded wood uses its internal energy to fulfill the goals of the drying process. The principle of maximum information leads to the main techniques, the use of which in drying will give the effect of resource saving. It has been established that to control the process of active ventilation, it is desirable to measure the temperature and humidity of the air at the inlet and outlet of the layer. It has been

established that to control the process of active ventilation, it is desirable to measure the temperature and humidity of the air at the inlet and outlet of the layer. For the calculation of drying by active ventilation, the well-known step method, which is based on a simplified mechanism of heat and mass transfer, was used as the most accessible. In accordance with the principle of maximum information, based on the results of modeling the drying process by active ventilation, it is proposed to increase the fan performance at times when the relative humidity is less than 65%. During the simulation, it was found that the drying time when adjusting the fan performance is 4.7 times shorter than with the conventional ventilation method. Drying unevenness remains at the same level or is reduced to 1%.

Keywords: *physical and mathematical modeling; technical system; internal energy; fan performance.*

Постановка проблеми

Подрібнену деревину в даний час у вітчизняній і світовій практиці зберігають в бункерних галереях з активним вентилюванням з одночасним сушінням [1]. Подрібнена деревина як технічна замкнена система перебуває в складному багатофакторному стані, тому, з позиції енергозбереження, необхідно всебічно досліджувати, моделювати всі процеси, що відбуваються в ній. Це дасть можливість найбільш раціонально підійти до схеми вентилювання, кількості та продуктивності вентиляторів. Автори підійшли до розв'язку цієї актуальної і практично корисної науково-технічної проблеми з позиції термодинаміки необоротних процесів [2] у комбінації з інформаційним підходом [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зберігання подрібненої деревини не є новою проблемою, але, враховуючи нинішній інтерес до використання відновлювальних джерел енергії, привернуло до неї посилену увагу багатьох науковців як вітчизняних, так і з-за кордону.

Багато сучасних вчених прийшли до висновку, що найбільш ефективним способом зберігання є зберігання в крупних сховищах – бункерних галереях [4, 5], але таке зберігання має ряд недоліків. До таких недоліків можна віднести самонагрівання та самозаймання [6, 7, 8]. Основними факторами, що впливають на ці процеси і які необхідно регулювати в процесі зберігання є температура і вологість [9].

Найбільш ефективним способом усунення недоліків є підсушування подрібненої маси шляхом вентиляції [1]. Вентилювання може бути активним або вітровим. Проте, незважаючи на чисельні дослідження цієї проблеми є потребу в подальшому їх розвитку в напряму оптимізації процесу підсушування подрібненої деревини для підвищення термінів зберігання з виключенням можливості самонагрівання та самозаймання.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є наукове обґрунтування поведінки шару подрібненої деревини під час сушіння і зберігання подрібненої деревини в бункерній галереї з активним вентилюванням шляхом математичного моделювання стану подрібненої деревини за критеріями мінімуму енерговитрат і максимальної продуктивності установки з урахуванням технічних обмежень параметрів обладнання галереї.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

1) розробити прийоми і методи для ресурсозбереження та інтенсифікації процесу активного вентилювання в бункерних галереях;

2) оптимізувати склад обладнання та параметри його роботи для зменшення енерговитрат під час сушіння подрібненої деревини активним вентилюванням.

Виклад основного матеріалу дослідження

Подрібнена деревина перебуває в стані спокою. Її внутрішня реакція визначається зовнішнім впливом x_1, який не вимагає ніякої корекції її поведінки. Зовнішній вплив x_0, у вигляді агента сушіння, відсутній. При цьому $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 1$, $p\left(\frac{x_0}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x_0}{y_1}\right) = H\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{X}{y_1}\right) = 0$. Кулька, що характеризує стан об'єкта перебуває в крайньому правому, стійкому положенні (рис. 1). Кут нахилу основи ентропійного пагорба визначається мінімальною енергією, необхідною для підтримки стійкого стану кульки. Здійснюється низькоенергетичний зовнішній вплив x_0, $U(x_0, y_1) < U(x_1, y_1)$.

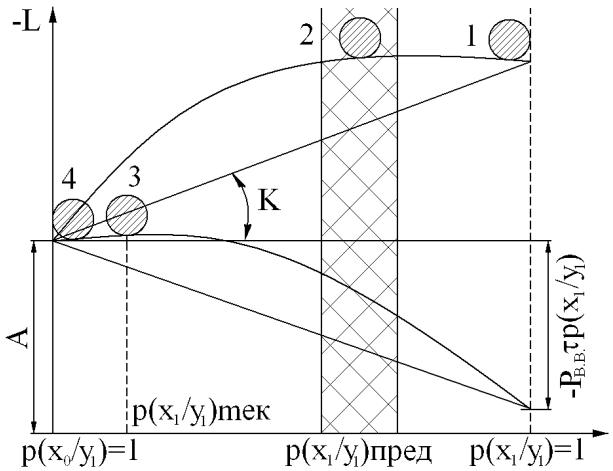

Рис. 1. Залежність корисності реакції об'єкта від умовної ентропії

Зовнішній вплив слабкий — температура, відносна вологість, швидкість сушильного агенту така, що об'єкт за рахунок внутрішніх реакцій дає змогу "утримати" свій поточний стан.

У такій ситуації велике значення набуває фактор часу. Представимо енергію як потужність, що віддається протягом часу $U = P\tau$. Тоді

$$-L = \left\{H\left(\frac{X}{y_1}\right) + \left[\lambda\left(P_3\tau(x_1, y_1) - P_{BB}\tau(x_0, y_1)\right)\right]p\left(\frac{x_1}{y_1}\right)\right\}p(Y) + A. \qquad (1)$$

Величина $P_3\tau = const$ і визначається багатьма факторами, що впливають на запас внутрішньої енергії об'єкта. Тривала дія зовнішнього впливу (P_{BB}) приводить не тільки до вичерпання запасеної енергії ($P_3\tau \downarrow$) і, як наслідок, до зменшення другої складової виразу $-L = \left\{H\left(\frac{X}{y_1}\right) + Kp\left(\frac{x_1}{y_1}\right)\right\}p(y_1) + A$, але і до збільшення реакції на зовнішній $p\left(\frac{x_0}{y_1}\right) \uparrow$ вплив, $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) \downarrow$ а $H(X, Y) \uparrow$.

Зменшення енергетики приводить до опускання правого краю основи кривої $H\left(\frac{X}{y_1}\right)$. Це повинно приводити до підвищення стійкості стану в крайньому правому положенні. Однак відбувається і зменшення умовної ймовірності $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right)$, тому корисність впливу падає (росте шкідливість), стан наближається до границі стійкості.

Перехід кульки в крайнє ліве положення визначається співвідношенням зміни швидкостей зміни $H\left(\frac{X}{y_1}\right)$ і $\Delta P_3\tau$. Якщо вплив зовнішнього впливу наростає швидше, ніж зменшення запасу енергії ($\frac{dH(X/y_1)}{d\tau} > \frac{d\Delta P_3\tau}{d\tau}$), то перехід (зрив регуляції) відбудеться

раніше. А якщо ні, то перехід кульки в крайнє ліве положення відбудеться не пізніше, ніж $p(x_0/y_1)$ стане більше $p(x_1/y_1)$.

Після зриву регуляції об'єкт перестає пручатися зовнішньому впливу. Шкідливість реакції може бути визначена з виразу

$$-L = \left\{H\left(\frac{X}{y_1}\right) - \lambda\left(P_{BB}\tau p\left(\frac{x_1}{y_1}\right)\right)\right\}p(Y) + A, \quad (2)$$

або

$$-L = \left\{H\left(\frac{X}{y_1}\right) + \left[\lambda\left(-P_3\tau(x_1, y_1) - P_{BB}\tau(x_0, y_1)\right)\right]p\left(\frac{x_1}{y_1}\right)\right\}p(Y) + A. \quad (3)$$

Графічно ситуацію можна подати положенням 3 кульки на рис. 1.

У випадку якщо реакцію (y_1) повністю буде визначати зовнішній вплив, то $p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x_0}{y_1}\right) = 1 = H(x_0)$, $H\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = 0$, $H\left(\frac{x}{y_1}\right) = 0$. Кулька перебуває в крайньому лівому стійкому положенні (положення 4 на рис. 1). Після зміни зовнішнього впливу позитивний ефект реакції об'єкта максимальний.

Аналіз поведінки подрібненої деревини, її реакції на зовнішні впливи дають змогу сказати, що для її сушіння ефективніше ті періоди зовнішнього впливу, коли реакція перебуває у фазі превентивного гальмування. Саме в цьому стані подрібнена деревина використовує внутрішню енергію для розв'язку цілей процесу сушіння.

З позиції принципу максимуму взаємної інформації виходить, що процес сушіння приводить до збільшення взаємної інформації. Однак для зниження енергоємності процесу необхідно використовувати такі режими сушіння, щоб "змушувати" подрібнену деревину якнайчастіше і довше перебувати в стані "превентивного гальмування". Стан подрібненої деревини при такому способі сушіння може бути презентовано графічно положенням 2 кульки на рис. 1.

Для реалізації способу сушіння в стані фізіологічного збудження необхідно, щоб кулька, що фізично моделює стан подрібненої деревини, робила коливальні рухи навколо точки зриву регуляції ($p\left(\frac{x_1}{y_1}\right) = p\left(\frac{x_0}{y_1}\right)$).

Використання електротехнологій (озонування агента сушіння, насичення повітря аероіонами, використання електроосмосу) є додатковим зовнішнім керованим впливом на подрібнену деревину. Це дає можливість більш гнучко управляти процесом сушіння. При досить невисоких енерговитратах (чим більше енерговитрати, тим нижче опускається правий край ентропійного пагорба, підвищуючи стійкість системи (рис. 1)), електротехнологія може значно впливати на величину умовної ентропії. Управляючи величиною електротехнологічного впливу, можна управляти реакцією на основний зовнішній вплив – агент сушіння.

Ще більшого ефекту можна добитися при періодичній дії електротехнологічного впливу. З'являється можливість збільшити в процесі сушіння кількість періодів превентивного гальмування, значно скоротивши енергоємність процесу.

В такому випадку застосування електротехнології в сушінні набуває зовсім іншої ролі. З другорядного допоміжного фактора електротехнологія стає "наймогутнішим" керуючим впливом, що підсилює процес сушіння.

З формули $I(X,Y) = H(X) - H\left(\frac{X}{Y}\right) = H(Y) - H\left(\frac{Y}{X}\right) \to max$ випливає, що добитися максимізації інформації процесу можна й іншим шляхом – збільшуючи $H(X)$ – безумовну ентропію процесу. Стосовно до процесу сушіння це означає наступне. Якщо

зовнішній вплив повністю визначає стан шару, то умовна ентропія $H\left(\frac{X}{Y}\right) \to 0$, а безумовна $H(X) \to max$. В ідеальному випадку $I(X, Y) = H(X) = max$.

Якщо використання під час сушіння електроактивованого повітря, озону, електроосмосу дає змогу управляти величиною умовної ентропії, то застосування полів НВЧ належить до іншого напряму – збільшенню безумовної ентропії. В цьому плані застосування НВЧ-полів те саме що і застосування сушіння в псевдоскрапленому і киплячому шарі.

З принципу максимуму інформації випливають три основні прийоми, використання яких у сушінні дасть ефект ресурсозбереження:

- циклічність, періодичність зовнішнього впливу на шар, що сушиться;
- використання зовнішнього впливу, який задає стан всього шару;
- зміна виду зовнішнього впливу в процесі сушіння.

Найбільший ефект у цьому випадку можна отримати при використанні електротехнології.

Виходячи з принципу максимуму інформації та досвіду практичного впровадження нових технологій в процес сушіння можна сказати, що для інтенсифікації процесу активного вентилювання можливе застосування наступних методів:

- зміна швидкості і напряму агента сушіння;
- використання електричних і магнітних впливів, потоків іонізованих і заряджених часток.

Далі дано обґрунтування контрольованих параметрів процесу активного вентилювання та виконана розробка засобів контролю процесу.

Розглянута інформативність кожного складового елемента комплексу "джерело інформації": атмосферне повітря (сушильний агент, система A), подрібнена деревина (деревна маса, система B) і всього комплексу в цілому (система (A, B)). Оцінка інформативності здійснювалася з урахуванням особливостей технології процесу сушіння активним вентилюванням і умов безпечного зберігання подрібненої деревини.

Можливість активного вентилювання атмосферним повітрям і швидкість сушіння залежить від його відносної вологості і температури. Тому дослідження проводилися по цих параметрах. Були визначені зміни оцінок математичного очікування відносної вологості і температури повітря протягом доби по місяцях. Як оцінку цих величин прийняли середнє значення вибірки.

Для оцінювання інформативності вимірювання параметрів атмосферного повітря використовували гістограми відносної вологості і температури. Увесь діапазон зміни відносної вологості повітря розділили на три ділянки: 0...70%; 70…80%; 80...100%. Імовірності того, що відносна вологість у будь-який час доби може належати кожній з ділянок, визначали по гістограмах. Так, для вибірки за липень імовірності по ділянках склали: $p_{F1} = 0{,}564$; $p_{F2} = 0{,}252$; $p_{F3} = 0{,}184$. Повну інформацію про вологість повітря знайшли, як

$$H(F) = H(F_1) + H(F_2) + H(F_3) =$$
$$= 0{,}564 \log_2 0{,}564 + 0{,}252 \log_2 0{,}252 + 0{,}184 \log_2 0{,}184 = 1{,}43 \text{ біт}.$$

Увесь діапазон температури повітря був розбитий на три ділянки: 0...10°С; 10...20°С; 20...35°С; з імовірностями потрапляння температури на даний інтервал для вибірки за липень $p_{T1} = 0$; $p_{T2} = 0{,}443$; $p_{T3} = 0{,}557$. Інформація про температуру склала $H(T) = 0{,}443 \log_2 0{,}443 + 0{,}557 \log_2 0{,}557 = 0{,}99$ біт.

Ентропія об'єднаної системи "температура-вологість" визначиться з рівняння: $H(A) = H(F_1\, T) = H(F) + H(T / F) = 1{,}43 + 0{,}546 = 1{,}976$.

Відповідно до принципу максимуму інформації при досягненні рівноважної вологості ентропія приймає мінімальне значення. В такому стані подрібнена деревина (система *B*) містить мінімальну інформацію, оскільки її стан повністю визначається агентом сушіння. Отже, основна частина інформації припадає на елемент "сушильний агент" системи.

При постійних вхідних параметрах повітря і рівномірному його розподілі по шару подрібненої деревини можна в будь-який момент часу розрахувати температуру і вологість шару. В цьому випадку контроль зводиться тільки до вимірювання вхідних параметрів сушильного агента, до підтримки їх на заданому рівні, дотриманню експозиції сушіння. Ентропія системи $H(A, B) = H(A)$, тобто інформації про вхідні параметри сушильного агента цілком достатньо для контролю процесу сушіння.

При випадкових змінах параметрів сушильного агента (атмосферного повітря), нерівномірності розподілу повітря по шару ситуація міняється. Повна ентропія системи "сушильний агент – деревний шар" запишеться у вигляді $H(A, B) = H(B / A) + H(A)$, де $H(B / A)$ – умовна ентропія системи *B* при зміні системи *A*.

Загальна ентропія системи зростає, губиться визначеність її стану на будь-якій змінній тимчасовій ділянці. Невизначеність стану буде коливатися при зміні ймовірностей взаємних станів систем *B* і *A*. Системи контролю постійно будуть відчувати змінний дефіцит інформації, еквівалентний перевищенню ентропії $H(B / A)$.

Цілком очевидно, що контролю тільки за вхідними параметрами сушильного агента недостатньо, необхідно компенсувати дефіцит інформації про зміни в шарі подрібненої деревини. Ентропія $H(B / A)$ розподіляється в масі подрібненої деревини між елементарними шарами. В процесі сушіння кожний елементарний шар має ентропію, що визначається з виразу:

$$H(L) = \frac{1}{N-K}\left(H\left(\frac{B}{A}\right) - H\left(\frac{B}{A}\frac{K}{N}\right)\right), \quad (4)$$

де $H(L)$ – ентропія елементарного шару, біт;

N – загальна кількість елементарних шарів, шт.;

K – кількість елементарних шарів, що перебувають у гігротермічній рівновазі з сушильним агентом, шт.

З отриманого виразу видно, що в процесі сушіння ентропія елементарного шару постійно змінюється, причому ці коливання характерні для конкретного шару і їх випадковість обумовлена випадковістю зміни вхідних параметрів сушильного агента. Тому якщо намагатися повністю ліквідувати дефіцит інформації $H(B / A)$ шляхом встановлення в шар датчиків (температури і вологості), то буде потрібно така їх кількість, скільки елементарних шарів. Причому багато з них, при знаходженні елементарного шару у гігротермічній рівновазі з сушильним агентом, ніякої корисної інформації передавати не будуть, тобто створюється надлишок інформації, становить $H(B / A) \times K / N$. Тому доцільно оцінити, яку інформацію про шар (система *B*) містить сушильний агент на її виході (система *C*).

Повна інформація про систему *B*, що входить в систему *C*, визначиться з виразу:

$$I_{C \to B} = H(B) - H\left(\frac{B}{C}\right),$$

де $I_{C \to B}$ – повна інформації про систему *B*, що знаходиться в системі *C*;

$H(B / C)$ – умовна ентропія зміни системи *B* при зміні системи *C*.

Але

$$H(B) = H\left(\frac{B}{A}\right), \text{ тому } I_{C\to B} = H\left(\frac{B}{A}\right) - H\left(\frac{B}{C}\right). \quad (5)$$

Звідси видно, що при контролі параметрів на виході сушильного агента невизначеність інформації про стан шару знижується на величину $I_{C\to B}$, але дефіцит інформації залишається, і він становить $H(B / C)$. Отже, невизначеність про весь товстий шар, при контролі над ним по вихідних параметрах агента сушіння, буде залишатися постійно, аж до завершення сушіння. Для вихідного елементарного шару $H(B / C)$ близька або становить 0 і $I_{C\to B} = H\left(\frac{A}{B}\right)$. Очевидно, що, контролюючи вихідні параметри сушильного агента, маємо повну інформацію про граничний вихідний шар. Цього цілком достатньо, тому що сушіння ведеться до висихання зовнішніх шарів.

Отже, для контролю процесу активного вентилювання бажано вимірювати температуру і вологість повітря на вході та виході з шару.

На практиці, для визначення можливості використання атмосферного повітря без підігріву для активного вентилювання, визначають, яку вологість забезпечить дане повітря при його застосуванні як агента сушіння. Інакше кажучи, визначають, яку рівноважну вологість (W_p) прийме шар при його тривалому продуванні атмосферним повітрям із заданими параметрами. Є залежність, що відображає взаємозв'язок вологості і параметрів повітря. Однак ця залежність застосовується для стаціонарних станів, коли немає тепловологообміну. Можливість використання її для контролю параметрів шару при вентилюванні вимагає уточнення. З цією метою проводили фізичне моделювання процесу сушіння активним вентилюванням.

Для розрахунків сушіння активним вентилюванням був використаний, як найбільш доступний, відомий східчастий метод, в основі якого знаходиться спрощений механізм тепло- і масообміну. Для розрахунків була розроблена програма для ПЕОМ алгоритмічною мовою високого рівня (С++).

Результати моделювання показали, що вологість шару подрібненої деревини, що розраховується по параметрах агенту сушіння на виході із шару, з достатньою точністю характеризує зміну вологості вихідних шарів, що підтверджує можливість використання засобів оцінювання рівноважної вологості для контролю над протіканням процесу активного вентилювання.

Як алгоритму функціонування засобу оцінювання рівноважної вологості прийнято рівняння Дея-Нелсона [10], що дає найменшу похибку визначення рівноважної вологості.

З усіма коефіцієнтами рівняння Дея-Нелсона записується у вигляді:

$$W_P = \sqrt[b_1 T^{b_2}]{-\frac{1}{a_1 T^{a_2}} ln(1-F)} \text{ або } W_p = a + b\Delta f + c\Delta T, \quad (6)$$

де $a = \left(\frac{1}{k} ln\left(\frac{1}{1-F_0}\right)\right)^{\frac{1}{n}}$; $b = \left(\frac{1}{k^{\frac{1}{1-n}}} ln\left(\frac{1}{1-F_0}\right)\right)^{\frac{1}{n-1}} \frac{1}{n(1-F_0)}$;

$$c = \left(\frac{1}{k} ln\left(\frac{1}{1-F_0}\right)\right)^{\frac{1}{n}} \left(a_2 b_2 \ln T_0 - b_2 ln\left(\frac{1}{a_1} ln\left[\frac{1}{1-F_0}\right]\right) - a_2\right) \frac{1}{b_1 T_0^{b_2}},$$

де $n = b_1 T^{b_2}$; $k = a_1 T^{a_2}$; F_0, T_0 – координати точки перегину кривої.

Для реалізації даної залежності розроблений і виготовлений засіб оцінювання рівноважної вологості. На його базі розроблений засіб оцінювання вологості подрібненої деревини.

Ґрунтуючись на особливостях повітрярозподілу в бункерах активного вентилювання, при пересуванні запірного клапана визначено, що для контролю процесу активного вентилювання можлива установка датчиків тільки в одній точці бункера, а

саме в нижній його частині на 1/3 висоти. Окрім цього, непрямий контроль дає змогу при необхідності пересувати датчик по висоті бункера і одержувати при цьому інформацію про розподіл вологості шару подрібненої деревини.

При визначенні необхідної частоти контролю вхідних параметрів повітря враховували їх добові коливання та вимоги по обмеженню вологості повітря при активному вентилюванні, пропоновані до системи регулювання. Необхідна частота контролю для цих регулюючих впливів визначалася з умови максимуму інформації для кожного виміру:

$$1-(1-p)^k=(1-p)^k; \text{ звідки } K=\frac{1}{log(1-p)}, \quad (7)$$

де p – імовірність виникнення необхідності регулюючого впливу при даному вимірі;
K – необхідна кількість разів контролю.

Встановлено, що вхідні параметри агента сушіння необхідно контролювати 10 разів на добу з інтервалом часу в 2,4 години протягом всього процесу активного вентилювання.

Результати моделювання сушіння при активному вентилюванні показали, що на початку процесу контроль вологості не потрібний. Частота коливань вологості в бункері активного вентилювання під час сушіння визначалася з періоду коливань T = 20 год. Відповідно до теореми Котельникова [3] періодичність контролю параметрів повітря на виході із шару склала 3,2 години.

Відповідно до принципу максимуму інформації, на підставі результатів моделювання процесу сушіння активним вентилюванням запропоновано збільшувати продуктивність вентилятора в моменти, коли відносна вологість повітря менше 65%. При цьому буде виконуватися зміна рівня трьох видів впливу – зміна температури і вологості атмосферного повітря і збільшення швидкості фільтрації повітря.

Результати моделювання показали, що тривалість процесу сушіння подрібненої деревини при регулюванні продуктивності вентилятора в 4,7 рази менше, ніж при звичайному способі вентилювання. Нерівномірність процесу сушіння залишається на тому ж рівні або знижується до 1%.

Висновки

Використання джерел відновлювальної енергії носить сезонний характер, що вимагає потребу їх довгого зберігання [4]. Для покращення умов зберігання зі збереженням властивостей подрібненої деревини необхідно проводити регулювання температури та вологості [2]. Для вирішення цієї проблеми багатьма дослідниками використовувались різноманітні способи моделювання процесів, що протікають при зберіганні [1, 5]. Питання пов'язані з проблемою самонагрівання та самозаймання більш детально розглянуті в роботі [6].

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – обґрунтовано використання інформаційного підходу для фізичного і математичного моделювання поведінки подрібненої деревини під час сушіння. Такий підхід дасть змогу раціонально підійти до схеми сушіння, більш оптимально визначати кількість і продуктивність вентиляторів без проведення додаткових експериментів.

Практична значущість результатів дослідження – отримані результати дають змогу оптимізувати склад обладнання та параметри його роботи, що дає змогу зменшити енерговитрати при використанні активного вентилювання під час сушіння подрібненої деревини.

Проведені дослідження з опису поведінки шару подрібненої деревини при сушінні та зберіганні з активним вентилюванням при використанні інформаційного підходу дають змогу зробити такі висновки: дано обґрунтування контрольованих параметрів процесу активного вентилювання та розроблено засоби контролю процесу; створена структурно-математична модель системи сушіння активним вентилюванням, розроблено критеріальне рівняння оптимальної величини енерговитрат на сушіння.

Список використаних джерел

1. Jylhä, Paula, Saleh Ahmadinia, Juha Hyvönen, Annamari (Ari) Laurén, Robert Prinz, Lauri Sikanen, & Johanna Routa. Self-Heating, Drying, and Dry Matter Losses of Stockpiled Stemwood Chips: The Effect of Ventilation. Energies, 2022, 15(19), 7094. https://doi.org/10.3390/en15197094

2. Градиський Ю.О., Суска А.А., В.І. Д'яконов, Сосєдко М.О. Інформаційний підхід до оптимізації процесу сушіння подрібненої деревини активним вентилюванням. Журнал з менеджменту, економіки та технологій. 2025. № 1. С. 249-258. URL: https://journal-met.kh.ua/jme012520.html

3. Erik Aneruda, & Anders Eriksson. Evaluation of an improved design for large-scale storage of wood chip and bark Biomass and Bioenergy, 2021. 154, 106255. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106255

4. Ashman, J. M., Jones, J. M., & Williams, A. Some characteristics of the self-heating of the large scale storage of biomass. Fuel Processing Technology, 2018. Vol. 174, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.004.

5. Michaela Skrizovska, Hana Veznikova, & Petra Roupcova. Inclination to self-ignition and analysisof gaseous products of wood chips heating. Acta Chimica Slovaca, 2020. Vol. 13, No. 1, 88–97. https://doi.org/10.2478/acs-2020-0013.

6. Wei, Jiayu, Can Yao, & Changdong Sheng. Modelling Self-Heating and Self-Ignition Processes during Biomass Storage. Energies, 2023. 16(10), 4048. https://doi.org/10.3390/en16104048.

7. Järvinen, Seppo, Lehtovaara, Jaakko, Pakkanen, Hannu, Salo, Marja, Alén, Raimo & Sirén, Pekka. Self-heating of wood pellets and possibilities for its controL. 4th International Bioenergy 2009 Conference – Sustainable Bioenergy, pp. 112–124. https://doi.org/10.13140/2.1.1201.0887.

8. Guo, W. Self-heating and spontaneous combustion of wood pellets during storage (T). Electronic Theses and Dissertations (ETDs) 2008+. University of British Columbia, 2013. Vol. 74, pp. 56–78. URL: https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0073583.

9. Іващенко П.В. Основи теорії інформації: навч. посіб. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015. 53 с.

10. Ekechukwu O.V. Drying Principles and Theory: an Overview. Italy, Trieste: International Centre for Theoretical Physics, 1995. – 26 p.

References

1. Jylhä, Paula, Saleh Ahmadinia, Juha Hyvönen, Annamari (Ari) Laurén, Robert Prinz, Lauri Sikanen, & Johanna Routa. Self-Heating, Drying, and Dry Matter Losses of Stockpiled Stemwood Chips: The Effect of Ventilation. Energies, 2022, 15(19), 7094. https://doi.org/10.3390/en15197094

2. Gradisskiy YU.A., Suska A.A., V.I. D'yakonov, Sosedko M.A. Informatsionnyy podkhod k optimizatsii protsessa sushki izmel'chennoy drevesiny aktivnym ventilirovaniyem. Zhurnal po menedzhmentu, ekonomike i tekhnologiyam. 2025. № 1. C. 249-258. URL : https://journal-met.kh.ua/jme012520.html

3. Erik Aneruda, & Anders Eriksson. Evaluation of an improved design for large-scale storage of wood chip and bark Biomass and Bioenergy, 2021. 154, 106255. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106255

4. Ashman, J. M., Jones, J. M., & Williams, A. Some characteristics of the self-heating of the large scale storage of biomass. Fuel Processing Technology, 2018. Vol. 174, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.004.

5. Michaela Skrizovska, Hana Veznikova, & Petra Roupcova. Inclination to self-ignition and analysisof gaseous products of wood chips heating. Acta Chimica Slovaca, 2020. Vol. 13, No. 1, 88–97. https://doi.org/10.2478/acs-2020-0013.

6. Wei, Jiayu, Can Yao, & Changdong Sheng. Modelling Self-Heating and Self-Ignition Processes during Biomass Storage. Energies, 2023. 16(10), 4048. https://doi.org/10.3390/en16104048.

7. Järvinen, Seppo, Lehtovaara, Jaakko, Pakkanen, Hannu, Salo, Marja, Alén, Raimo & Sirén, Pekka. Self-heating of wood pellets and possibilities for its controL. 4th International Bioenergy 2009 Conference – Sustainable Bioenergy, pp. 112–124. https://doi.org/10.13140/2.1.1201.0887.

8. Guo, W. Self-heating and spontaneous combustion of wood pellets during storage (T). Electronic Theses and Dissertations (ETDs) 2008+. University of British Columbia, 2013. Vol. 74, pp. 56–78. URL: https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0073583.

9. Ivashchenko P.V. Fundamentals of information theory: teaching. manual. Odesa: ONAZ named after O.S. Popova, 2015. - 53 p.

10. Ekechukwu O.V. Drying Principles and Theory: an Overview. Italy, Trieste: International Centre for Theoretical Physics, 1995. – 26 p.