**Цуркан О.В.**

д.т.н., професор

Спирін А.В.

к.т.н., доцент

*Відокремлений
структурний підрозділ
«Ладжинський фаховий
коледж ВНАУ»*

Руткевич В.С.

к.т.н., доцент

Дідик А.М.

Аспірант

*Вінницький національний
аграрний університет*

Tsurkan O.Doctor of Technical Sciences,
Professor**Spirin A.**Ph.D. of Engineering, Associate
Professor

*Separated structural unit
«Ladyzhyn Professional
College of Vinnytsia
National Agrarian*

Rutkevych V.Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Didyk A.**

postgraduate student

*Vinnytsia National Agrarian
University*

УДК: 66.047.45**DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-1**

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ В КОНВЕКТИВНО- ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ

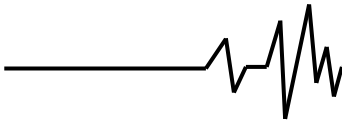
Операція сушіння є найбільш енергозатратною з усіх технологічних операцій післязбиральної обробки рослинної продукції сільського господарства. Підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є першочерговою задачею при плануванні та реалізації технології післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції, в тому числі і волоських горіхів. Існує цілий ряд способів підвищення ефективності процесу сушіння, тому ще на етапі теоретичних та лабораторних досліджень важливо оцінити пропоновані заходи і засоби. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те що оцінка ефективності процесу сушіння здійснювалась, в більшості випадків, за двома критеріями – коефіцієнтом корисної дії та питомою витратою теплової енергії на випаровування вологи. В ряді випадків разом з енергетичним аналізом виконувався і ексергетичний. Ексергетичний аналіз дозволяє вишукувати шляхи підвищення ефективності роботи сушильної установки, аналізуючи причини втрати ексергії у вузлах і обґрунтовуючи рекомендації по вдосконаленню циклів теплоенергетичних установок. На конвективно-вібраційній сушарці були проведені лабораторно-виробничі випробування по сушінню волоських горіхів. При цьому були досягнуті такі енергетичні показники: коефіцієнт корисної дії установки становив 0,4 при питомій витраті енергії на випаровування вологи 3,91 МДж/кг. При розрахунку і проектуванні теплообмінних пристроїв, в тому числі сушарок використовуються елементи теорії подібності. В загальній теорії і практиці теплопередачі, в тому числі і при дослідженні процесів сушіння, використовують біля двох десятків критеріїв. Для оцінки ефективності процесу сушіння волоських горіхів пропонується, в першу чергу, використовувати критерії Нуссельта і Рейнольдса. Порівняння аналогічних критеріїв двох (або більшого числа) процесів або конструктивних елементів можуть дати рішення про доцільність застосування певного елемента системи.

Ключові слова: сушіння, волоський горіх, коефіцієнт корисної дії, ефективність процесу, вологи, тепла енергія.

Постановка проблеми. Практично вся рослинна сільськогосподарська продукція під час післязбиральної обробки потребує проведення технологічної операції сушіння. В цьому ряду культур не є винятком і волоські горіхи. Згідно нормативним вимогам [1] кінцева середня вологість волоського горіху має становити 10%. Із саду на пункт

післязбиральної обробки горіх поступає зі значно більшою вологістю (30-50%) яка залежить від сорту, кліматичних умов під час збирання урожаю тощо.

Операція сушіння є найбільш енергозатратною з усіх технологічних операцій післязбиральної обробки рослинної продукції сільського господарства. У деяких випадках її



доля може становити до 40-50% усіх енергозатрат технології. Тому підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є першочерговою задачею при плануванні та реалізації технологій післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції, в тому числі і волоських горіхів.

В теорії сушки існує багато способів інтенсифікації цього процесу, хоча на практиці їх використовується значно менше. Вибір того або іншого способу інтенсифікації процесу залежить від цілого ряду факторів, перш за все від конкретних умов виробництва, наявного обладнання і енергозабезпечення, виду продукції тощо. Тому ще на етапі теоретичних і лабораторно-експериментальних досліджень важливо попередньо оцінити ефективність вибраної стратегії щоб уникнути зайвих затрат коштів і часу на перебір варіантів інтенсифікації процесу.

Саме способам оцінки ефективності реалізації процесу сушіння волоських горіхів і присвячена дана стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постає питання, а чому треба приділяти багато уваги проблемі інтенсифікації процесу сушіння на серійному або експериментальному обладнанні. Проблема полягає в тому що окремих випадків роботи обладнання (культура, умови виробництва і переробки, забезпеченість всілякими потребами тощо) значно більше ніж конструкцій сушильного обладнання. Адже для кожного окремо взятого випадку неможливо виготовити унікальне обладнання яке буде працювати з максимальною ефективністю. Тим більше, що серійні сушильні установки працюють на 25% від можливостей "ідеальної" сушарки [2].

Тому наразі актуальним є питання попередньої оцінки ефективності роботи сушильного обладнання. Над вирішенням цієї проблеми працюють вітчизняні та зарубіжні дослідники.

В роботі [3] проаналізовані способи сушіння капілярно-пористих матеріалів на сушарці з комбінованою подачею тепла. Традиційно (для цього авторського колективу) рекомендовано для інтенсифікації процесу сушіння використовувати сушильне обладнання з тепловим насосом. На нашу думку цей напрямок інтенсифікації процесу сушіння є доволі перспективним.

При аналізі способів сушіння та оцінці конкретних заходів та засобів для реалізації процесу використовують, як правило, енергетичні показники – коефіцієнт корисної дії та питому витрату енергії на випаровування вологи з матеріалу [4,5,6,7,8]. В роботі [4] розглядається процес сушіння зерна в шахтній сушарці. Основною метою досліджень є аналіз

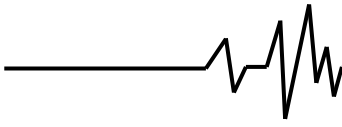
факторів які впливають на коефіцієнт корисної дії сушарки. Розглядаються можливі шляхи підвищення цього показника перш за все шляхом зменшення втрат енергії з відпрацьованим сушильним агентом. Потрібно відмітити що коефіцієнт корисної дії перш за все залежить саме від втрат енергії різних видів: втрати енергії в теплогенераторі, трубопроводах, конструктивних елементах та арматурі, з вихідним повітрям тощо.

В роботах [5,8] досліджується процес сушіння насінневого зерна на конвективній сушарці з тепловим насосом. Відмічено що коефіцієнт корисної дії такої сушарки, а також питома витрата палива на випаровування вологи збільшуються в порівнянні з серійним обладнанням на 13-17%. В основному це пов'язано із зменшенням втрат енергії з відпрацьованим теплоносієм. Як ми вже відмічали, цей спосіб інтенсифікації процесу сушіння рослинного матеріалу, а також вібраційна дія на шар матеріалу, на нашу думку, є найбільш перспективними напрямками подальшого вдосконалення процесів сушіння.

Роботи [6,7] присвячені окремим випадкам сушіння конкретної продукції, а також використання сонячної енергії для реалізації процесу сушіння. В роботі [6] досліджуються енергетичні аспекти перебігу сушіння сої, намічаються шляхи на зниження втрат теплової енергії що дозволить збільшити коефіцієнт корисної дії процесу. Робота [7] присвячена специфічному випадку - використанню сонячної сушарки. Специфіка роботи установок що використовують сонячну енергію полягає в тому, що їх робота певним чином пов'язана з погодними умовами, а саме з величиною сонячної радіації. Окрім того, в роботі геліосушарок відіграє певну роль такий фактор як відсутність забруднення поверхонь, які сприймають сонячну радіацію.

У наведених прикладах оцінка ефективності процесу сушіння здійснювалась, в більшості випадків, за двома критеріями – коефіцієнтом корисної дії та питомою витратою теплової енергії на випаровування вологи. В ряді робіт які будуть розглянуті далі, використовують ще один показник- ексергію процесу. Нагадаємо, що ексергія – та максимальна кількість роботи, яку можна одержати від заданої кількості теплоти або речовини, якщо параметри цієї теплоти або речовини привести (шляхом оборотних процесів) у рівновагу з навколишнім середовищем.

Як правило, ексергетичний аналіз виконується разом з енергетичним як, наприклад, в роботах [9,10]. В обох роботах досліджувався процес сушіння в тонкому шарі різних матеріалів – скибочок картоплі та плодів



шовковиці. Відмічається що ексергетичний аналіз є доповненням до енергетичного, допомагає виявити 'вузькі' місця в технологічному процесі сушіння.

В роботах [11,12] на основі ексергетичного аналізу процесу сушіння знаходяться оптимальні параметри процесу сушіння таких різних матеріалів як зерно і листя м'яти. Однак і цьому випадку ексергетичний аналіз проводиться сумісно з іншими дослідженнями, в основному з енергетичним аналізом.

Роботи [13,14] підтверджують що ексергетичний аналіз поряд з енергетичним аналізом можуть дати оцінку ефективності процесів сушіння різних матеріалів і на різних сушильних установках. Адже в [13] мова йде про сушарку циклонного типу, а в [14] описаний процес сушіння фісташки на геліосушарці.

Ексергетичний аналіз дозволяє вишукувати шляхи підвищення ефективності роботи сушильної установки, аналізуючи причини втрати ексергії у вузлах і обґрунтовуючи рекомендації по вдосконаленню циклів теплоенергетичних установок.

Але до ексергетичного аналізу варто відноситись з певною обережністю, пам'ятаючи, що ексергія теплоти може мати практичну цінність, яка дорівнює нулю (при температурі теплоти, близької до температури навколишнього середовища). А саме при сушінні, зокрема, волоських горіхів використовується сушильний агент з температурою яка відрізняється і від температури навколишнього середовища лише на 10-150С. Адже ядро горіха має підвищений вміст олії і при високих температурах матеріал буде втрачати показники якості [15]. Слід одночасно оцінювати і витрати, яких доведеться зазнати, щоб використати ексергію теплоти. Тобто необхідно проводити техніко-економічний (термоекономічний та енергетичний) аналіз при розгляді процесів та циклів сушильних установок.

Аналіз літературних джерел свідчить про те що в більшості випадків для оцінки ефективності процесу сушіння використовують енергетичні та ексергетичні параметри процесу, або окремо кожен із них, або в комплексі. В якості енергетичних параметрів використовують коефіцієнт корисної дії конкретної установки та питому витрату енергії на випаровування вологи із матеріалу. Для реалізації даних методів оцінки ефективності процесу сушіння потрібно провести повний цикл переробки матеріалу, тобто висушити його від початкової вологості з якою він поступає на вхід установки, до кінцевої вологості з якою матеріал направляється на зберігання або на подальшу переробку. Це потребує певних затрат

робочого часу на проведення замірів потрібних параметрів, а головне – значного часу для закінчення всього технологічного циклу.

На нашу думку цей громіздкий перебіг оцінки ефективності процесу сушіння можна спростити і прискорити. Саме розробці цього питання і присвячена дана стаття.

Мета роботи. є інтенсифікація перебігу сушіння волоських горіхів шляхом удосконалення оцінки ефективності процесу

Результати досліджень.

Для сушіння волоських горіхів автори використовували конвективно-вібраційну сушарку. За браком місця в даній статті ми не приводимо схему та опис цього обладнання. Цей матеріал вже був опублікований в декількох роботах, наприклад, в [16]. Як вже було сказано основним критерієм енергетичної ефективності сушильного обладнання прийнято вважати [17] термічний коефіцієнт корисної дії, що являє собою відношення теплоти що витрачена на випаровування вологи з горіхів (її можна назвати корисно використаною теплотою q_k) до всієї теплоти (q_3) яку затрачено на процес видалення вологи:

$$\eta_T = \frac{q_k}{q_3} \quad (1)$$

Затрачена теплота в розрахунку на один кілограм атмосферного повітря в блоці ТЕН (теплоелектричний нагрівач), визначається співвідношенням [18]:

$$q_3 = c_p(t_1 - t_0) \quad (2)$$

де c_p – питома теплоємність повітря, Дж/кг⁰С;

t_1 – температура сушильного агента на вході в конвективно-вібраційну сушарку, ⁰С;

t_0 – температура повітря, що подається в блок ТЕН (температура атмосферного повітря), ⁰С.

Теплота, яка витрачається на випаровування вологи, віднесена до 1 кг атмосферного повітря, визначається [19]:

$$q_k = \frac{r(d_2 - d_1)}{1000} \quad (3)$$

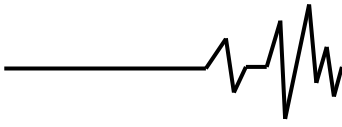
де d_1, d_2 – вологовміст сушильного агента відповідно на вході і виході сушарки, $\frac{\text{кг}_e}{\text{кг}_{cp}}$;

r – питома теплота випаровування, Дж/кг.

Тоді вираз для термічного ККД сушарки можна записати:

$$\eta_T = r \frac{d_2 - d_1}{c_p(t_1 - t_0)} 10^{-3} \quad (4)$$

Аналіз виразу (4) дозволяє зробити декілька висновків. Максимального значення ККД конвективно-вібраційної сушарки буде досягати при найбільшій різниці вологовмісту сушильного агента на вході і виході сушарки, тобто коли вологовміст відпрацьованого сушильного агента досягне насичення:



$d_2 = d_{min}$ (відносна вологість при цьому буде 100%), а його температура знизиться до значення $t_2 = t_{min}$.

Для конвективного способу сушіння, який ми використовуємо при сушінні горіхів, енергетичний ККД сушарки можна визначити із загальновідомого співвідношення [19]:

$$\eta_{конв} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (5)$$

де t_2 – температура відпрацьованого сушильного агента, °С.

Дане рівняння відображає суто теоретичний випадок коли корисною вважається вся теплота, що виділяється теплоносієм в сушарці. Тому максимально можлива величина ККД (теоретична) визначається наступним співвідношенням:

$$\eta_{max} = \frac{(t_1 - t_M)}{(t_1 - t_0)} \quad (6)$$

де t_M – температура мокрого термометра, °С.

Температура сушильного агента – початкова (t_1) і кінцева (t_2) неоднозначно впливають на термічний ККД сушарки. Відповідно співвідношенню (5) ККД збільшується при підвищенні t_1 . При цьому має збільшуватись швидкість сушіння і зменшуватись t_2 . Однак, при цьому збільшується і температура матеріалу що знаходиться в сушарці, в нашому випадку - це волоські горіхи. Підвищення температури горіхів має свою межу. Адже при збільшенні температури ядра горіхів понад 28°С відбувається зменшення вмісту олії в ньому, що негативно впливає на показники якості [15]. При цьому зменшується ступінь насичення сушильного агента, тобто зменшується різниця між d_1 і d_2 [20]. Також збільшується температура t_2 що призводить до зменшення ККД.

Ще одним способом визначення енергетичної ефективності сушарки можуть бути питомі витрати енергії на одиницю вологи що випаровується q_0 , або висушеного матеріалу q_M , що може бути кількісно оцінено співвідношенням [21]:

$$q_0 = \frac{c_p(t_1 - t_0)}{(d_2 - d_1)10^{-3}} = \frac{I_1 - I_0}{(d_2 - d_1)10^{-3}}, \quad (7)$$

де I_1, I_0 – ентальпія сушильного агента на вході до сушарки і на вході в блок ТЕН, відповідно, Дж.

Величина $\Delta d = d_2 - d_1$ в знаменнику (7) визначає кількість випарованої вологи і згідно [21] може бути визначена із співвідношення:

$$\Delta d = \frac{c_p(t_1 - t_2) - \sum Q_{втр}}{f(t,r) + r_1} \quad (8)$$

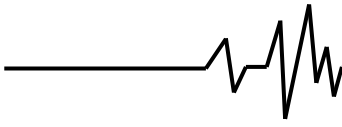
В формулі (8) вираз $\sum Q_{втр}$ означає непродуктивні витрати теплової енергії,

простіше кажучи втрати. Це енергія яка витрачається на нагрів корпусу сушарки, елементів конструкції, тепло яке виходить з відпрацьованим сушильним агентом, з готовою продукцією тощо. Функція $f(t,r)$ залежить від співвідношення температури сушильного агента на вході та виході із сушарки та властивостей матеріалу, особливо швидкості випарування вологи. Вираз r_1 відображає кількість теплоти що сприймає одиниця вологи (1 кг) в сушарці. Всі ці три величини залежать від індивідуальних особливостей сушарки та матеріалу, і можуть бути розраховані для кожного конкретного випадку процесу сушіння.

На конвективно-вібраційній сушарці що детально описано в [16] були проведені лабораторно-виробничі випробування по сушінню волоських горіхів. Горіхи масою 950 кг початковою вологістю 38% були висушені до 10% за 7 годин при температурі навколишнього середовища 14,6°С. При цьому були досягнуті такі енергетичні показники: коефіцієнт корисної дії установки становив 0,4 при питомій витраті енергії на випаровування вологи 3,91 МДж/кг. Слід відмітити що це зовсім непогані результати зважаючи на те що у серійних сучасних конвективних сушарок останній показник становить 5- 6 МДж/кг [2].

Ексергетичний аналіз процесу сушіння в даному випадку не проводився. Як сказано в [22] для проведення ексергетичного аналізу потрібно умовно поділити установку на складові частини (вузли), визначити втрати ексергії за кожним із вузлів. Це потребує розробки окремої методики, наявності додаткової контрольно-виміральної апаратури, затрати додаткових трудових і економічних ресурсів. Але ексергетичний аналіз може суттєво доповнити енергетичний, тому що, як сказано в [22] він дозволяє виявити необоротності процесів що спричиняють втрати ексергії які органічно притаманні тепловим системам і не можуть бути усунені чи істотно знижені без зміни структури системи або її частини. Автори планують в своїх подальших дослідженнях звернутись до ексергетичного аналізу з метою виявлення "вузьких" з точки зору енергоефективності вузлів сушильної установки.

При розрахунку і проектуванні теплообмінних пристроїв, в тому числі сушарок використовуються елементи теорії подібності. Це дозволяє зменшити число незалежних змінних спростивши таким чином розроблення математичних моделей процесу сушіння. Теорія подібності також дає правила моделювання і дозволяє розповсюдити результати обмеженого числа експериментів на групу подібних явищ. В теорії подібності широко використовують критерії подібності.



Критерій – безрозмірний комплекс, який характеризує відношення фізичних ефектів, але не є цим відношенням. Іншими словами критерій є мірою відношення фізичних ефектів.

В загальній теорії і практиці теплопередачі, в тому числі і при дослідженні процесів сушіння, використовують наступні критерії.

Критерій Нуссельта який характеризує відношення інтенсивності конвективного теплового потоку (α) до інтенсивності теплообміну кондукцією в шарі плинного середовища поблизу матеріалу (λ_f / R_0).

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda_{ca} / R_0}$$

де R_0 – характерний розмір об'єкта сушіння.

Критерій Фур'є $F_0 = a^r / R^2$ має сенс узагальненого часу. Він ще має назву – число теплової гомохромності (однорідності за часом). Критерій F_0 характеризує зв'язок між швидкістю зміни температурного поля, фізичними властивостями і розмірами тіла.

Критерій Біо $Bi = HR$ – відношення зміни теплоти, яке може бути підведено до тіла, і теплою, яка відводиться від поверхні вглиб тіла.

Критерій Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot R_0}{\nu}$ характеризує відношення сил інерції і сил тертя, де V – швидкість сушильного агенту; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, R_0 – характерний розмір матеріала.

Взагалі в теорії теплопередачі використовують біля двох десятків критеріїв подібності, які характеризують процеси тепло- і масопереносу, в тому числі і під час сушіння. Але по темі даної статті найбільший інтерес становлять критерії Нуссельта Nu і критерій Рейнольдса Re . Адже саме ці критерії найповніше характеризують інтенсивність процесу сушіння. В склад критерія Нуссельта входить коефіцієнт теплообміну α який характеризує інтенсивність передачі теплової енергії від сушильного агенту до матеріалу. В кожному процесі сушіння будь-якого матеріалу першочерговою задачею є збільшення коефіцієнта теплообміну. А коефіцієнт теплообміну в першу чергу залежить від швидкості сушильного агенту. В першому наближенні взаємодія теплоносія і псевдозрідженого під дією вібрації шару горіхів може бути описана класичним критеріальним рівнянням обтікання теплоносієм пучка труб розташованих в шаховому порядку:

$$Nu_t = 0,37Re^{0,6} \quad (9)$$

Турбулізація потоку теплоносія (що веде за собою збільшення критерія Рейнольдса) підвищує коефіцієнт теплообміну, тобто збільшує енергоефективність процесу сушіння. При проведенні лабораторно-виробничих випробувань по сушінню горіхів вібраційна дія на шар горіхів, що знаходились в сушильній камері, збільшувала середню швидкість потоку теплоносія в 1,25 рази, відповідно збільшувались і показники ефективності процесу, тобто коефіцієнт корисної дії та питома затрата енергії на випаровування вологи.

Якщо коефіцієнт корисної дії та питома витрата палива на випаровування вологи можна вважати абсолютними показниками ефективності процесу сушіння, то критерії (часткові показники) характеризують окремі сторони багатогранного процесу сушіння. Порівняння аналогічних критеріїв двох (або більшого числа) процесів або конструктивних елементів можуть дати рішення про доцільність застосування певного елемента системи.

Всі ці показники ефективності процесу сушіння (коефіцієнт корисної дії питома витрата палива на випаровування вологи, ексергетичний аналіз процесу, критерії теорії подібності) можуть бути використані при дослідженні даного процесу. Вони можуть використовуватись як індивідуально, так і комплексно, доповнюючи один одного.

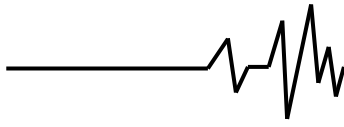
Висновки:

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те що наразі основними оцінками ефективності процесу сушіння є коефіцієнт корисної дії установки, питома витрата енергії на випаровування вологи та, в меншій мірі, ексергетичний аналіз процесу.

2. Проведені лабораторно-виробничі випробування конвективно-вібраційної сушарки на волоських горіхах показали що ККД обладнання становить 40%, питома витрата енергії на випаровування вологи 3,91 МДж/кг, що майже в 1,5 рази краще сучасних серійних сушарок.

3. Підвищення ефективності процесу сушіння відбулось через вібраційну дію на шар горіхів завдяки чому зменшився аеродинамічний опір, відбулась турбулізація граничного шару між матеріалом і теплоносієм за рахунок нерівномірності обтікання окремих елементів конгломерату.

4. Запропоновано в якості часткової оцінки ефективності процесу сушіння використовувати критерії подібності, в першу чергу критерії Нуссельта і Рейнольдса. Порівняння аналогічних критеріїв двох (або більшого числа) процесів або конструктивних



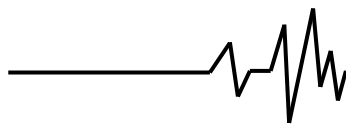
елементів можуть дати рішення про доцільність застосування певного елемента системи.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г.М., Цуркан О.В., Спірін А.В., Дідик А.М. Технологія переробки волоських горіхів. Вібрації в техніці та технологіях. 2024. № 2 (113). С. 5-13.
2. Підгородецький О. Економне сушіння. Журнал «The Ukrainian Farmer». Березень 2016. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://agrotimes.ua/article/ekonomne-sushinnya/> (дата звернення 26.04.2023)
3. Снежкін Ю.Ф., Муляр В.П., Дабіжа Н.О. Аналіз сучасних способів сушіння та розробка оптимального режиму сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у теплонасосній сушарці з комбінованим тепlopідводом. *Кераміка: наука і життя*. Березень 2016. Doi:10/26909/csl.1,2016.5
4. Алейников В.І., Бейко С.Б. Підвищення енергетичного к.к.д. у зерносушарці АІ-ДСП-50. *Наукові праці ОДАХТ*. вип. 21. – С.22-24.
5. Пазюк В.М., Дуб В.В., Сєдих К.В. Фактори підвищення інтенсивності та енергоефективності сушіння зернових культур. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2023. №5, С.123-130.
6. Цизь К.С., Кірчук Р.В. Дослідження процесу та пошук шляхів інтенсифікації сушіння насіння сої. *Конструювання, експлуатація та виробництво с/г машин*. 2012. Вип.42. Ч.2. С.75-78.
7. Трофименко А.В., Трофименко В.В. Аналіз факторів, що впливають на ефективність роботи сонячної сушарки/ Відновлювальна енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: Матеріали ХХІІ міжнар. Наук.-практ. конф. – Київ: Інститут відновлювальної енергетики НАНУ. 2021.-С.574-580
8. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Пазюк В.М. Інтенсифікація процесу сушіння насінневого зерна. *Пром. Теплотехніка*. 2010. Т. 32. №5. С.42-47.
9. Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., 2008. Energy and Exergy Analyses of Thin-Layer Drying of Potato Slices in a Semi-Industrial Continuous Band Dryer. *Drying Technology* 26, 1501–1508.
10. Akbulut, A., Durmuş, A., 2010. Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy, Demand Response Resources: the US and International Experience* 35, 1754–1763.
11. Colak, N., Kuzgunkaya, E., Hepbasli, A., 2008. Exergetic Assessment of Drying of Mint Leaves in a Heat Pump Dryer. *Journal of Food Process Engineering* 31, 281–298.
12. Gunasekaran, S., Thompson, T.L., 1986. Optimal energy management in grain drying. *C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 25, 1–48.
13. Kavak Akpınar, E., Midilli, A., Bicer, Y., 2005. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management* 46, 2530–2552.
14. Midilli, A., Kucuk, H., 2003. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy* 28, 539–556.
15. Як правильно сушити горіхи [Електронний ресурс].- Режим доступу: <http://fakty.ua/408294> (дата звернення 12.02.2024)
16. Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів. *Вісник Хмельницького національного університету серія: Технічні науки*. 2024. № 2 (333). С. 393-399.
17. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Степаненко С.П., Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): Монографія/ Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М. 2017.-552 с.
18. Котов Б.І. Аналіз тенденцій підвищення паливно-енергетичної ефективності зерносушарок. *Зб. Н. праць Кіровоградського державного технічного університету*. 2001. Вип. 10.- С.227-232.
19. Котов Б.І., Лісецький В.О. Аналіз впливу режимів сушіння на енергетичні характеристики зерносушарок. *Вісник ХДТУСГ*. Харків. 2001. Т.1. Вип.8. С. 166-170.
20. Спірін А., Грицун А., Флеш Р. Сушарка для зерна. *Техніка АПК*. 1998. №2.- С.19-20.
21. Лісецький В.О. Результати дослідження експериментальної бункер-сушарки. *Науковий вісник НАУ*. Вип. 33. К.: 2016. С.120-126.
22. Куделя П.П., Дубовський С.В. Енергетичний і ексергетичний аналіз типових систем опалення. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. №2. С.25-34.

References

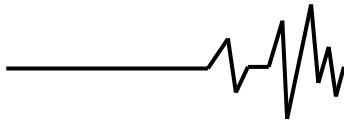
1. Kaletnik G., Tsurkan O., Spirin A., Didyk A. (2024). Technology of walnut processing. *Vibrations in engineering and technology*. № 2 (113). P. 5-13. [in Ukrainian]
2. Pidgorodetsky O. Economical drying. Journal «The Ukrainian Farmer». Березень 2016. [Electronic resource]. – Access mode: <https://agrotimes.ua/article/ekonomne-sushinnya/> (access date 4/26/2024) [in Ukrainian]



3. Snezhkin Yu.F., Mulyar V.P., Dabizha N.O. (2016). Analysis of modern drying methods and development of optimal drying mode of colloidal capillary-porous materials in a heat pump dryer with combined heat supply. *Ceramics: Science and Life*. [in Ukrainian]
4. Aleinikov V.I., Beiko S.B. Increasing the energy efficiency in the AI-DSP-50 grain dryer. *Scientific works of OSADHT*. Issue. 21, pp. 22-24. [in Ukrainian]
5. Pazyuk V.M., Dub V.V., Sedykh K.V. (2023). Factors of increasing the intensity and energy efficiency of drying of grain crops. *Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*. No5, pp.123-130. [in Ukrainian]
6. Tsyz K.E., Kirchuk R.V. (2012). Research of the process and search for ways to intensify the drying of soybean seeds. Design, operation and production of agricultural machinery. Issue 42. Part 2, pp. 75-78. [in English]
7. Trofymenko A.V., Trofymenko V.V. Analysis of factors influencing the efficiency of the solar dryer. Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: Materials of the XXII International. Scientific and Practical Conf. – Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2021.-P.574-580 [in Ukrainian]
8. Snezhkin Yu.F., Shapar R.O., Chalaev D.M., Shavrin V.S., Pazyuk V.M. (2010). Intensification of the process of drying seed grains. *Prom. Heat engineering*. T. 32. №5. P.42-47. [in English]
9. Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A. (2008). Energy and Exergy Analyses of Thin-Layer Drying of Potato Slices in a Semi-Industrial Continuous Band Dryer. *Drying Technology* 26, 1501–1508. [in English]
10. Akbulut, A., Durmuş, A. (2010). Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy, Demand Response Resources: the US and International Experience* 35, 1754–1763. [in English]
11. Colak, N., Kuzgunkaya, E., Hepbasli, A. (2008). Exergetic Assessment of Drying of Mint Leaves in a Heat Pump Dryer. *Journal of Food Process Engineering* 31, 281–298. [in English]
12. Gunasekaran, S., Thompson, T.L., 1986. Optimal energy management in grain drying. *C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 25, 1–48. [in English]
13. Kavak Akpınar, E., Midilli, A., Bicer, Y. (2005). Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management* 46, 2530–2552. [in English]
14. Midilli, A., Kucuk, H., (2003). Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy* 28, 539–556. [in English]
15. How to dry nuts [Electronic resource]. Access mode: <http://fakty.ua/408294> access date 2/12/2024) [in Ukrainian]
16. Tsurkan O., Spirin A., Rutkevich V., Didyk A. (2024). Development of a convective-vibrating dryer for drying walnuts. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University Series: Technical Sciences*. № 2 (333). C. 393-399. [in Ukrainian]
17. Kotov B.I., Kalinichenko R.A., Stepanenko S.P., Shvydia V.O., Lisetskyi V.O. Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling): Monograph. Nizhyn: Publisher PP Lysenko M.M. 2017.-552 p.
18. Kotov B.I. Analysis of trends in improving the fuel and energy efficiency of grain dryers. *Coll. Proceedings of Kirovograd State Technical University*. 2001. Vyp. 10.- P.227-232. [in Ukrainian]
19. Kotov B.I., Lisetskyi V.O. Analysis of the influence of drying modes on the energy characteristics of grain dryers. *Visnyk KSTUSG*. Kharkiv. 2001. T.1. Issue 8, pp. 166-170. [in Ukrainian]
20. Spirin A., Gritsun A., Flesch R. (1998). Grain dryer. Machinery of the agro-industrial complex.. No2.- P.19-20. [in Ukrainian]
21. Lisetskyi V.O. (2016). Results of the experimental bunker-dryer study. *Scientific Bulletin of NAU*. Vyp. 33. P.120-126. [in Ukrainian]
22. Kudelia P.P., Dubovsky S.V. (2022). Energy and exergetic analysis of typical heating systems. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. №2. P.25-34. [in Ukrainian]

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE WALNUT DRYING PROCESS IN A CONVECTIVE-VIBRATING DRYER

The drying operation is the most energy-intensive of all technological operations of post-harvest processing of plant agricultural products. Improving the energy efficiency of drying equipment is a top priority in planning and implementing technologies for post-harvest processing of agricultural products, including walnuts. There are a number of ways to increase the efficiency of the drying process, therefore, even at the stage of theoretical and laboratory research, it is important to evaluate the proposed measures and means. Analysis of recent studies and publications shows that the assessment of the efficiency of the drying process was carried out, in most cases, according to two criteria – the coefficient of efficiency and the specific consumption of thermal energy for moisture evaporation. In some cases, along with the energy analysis, the exergetic analysis was also performed. Exergetic analysis allows you to look



for ways to increase the efficiency of the drying plant, analyzing the causes of the loss of exergy in the units and substantiating recommendations for improving the cycles of thermal power plants. Laboratory and production tests for drying walnuts were carried out on a convective-vibration dryer. At the same time, the following energy indicators were achieved: the efficiency of the unit was 0.4 with a specific energy consumption for moisture evaporation of 3.91 MJ/kg. In the calculation and design of heat exchangers, including dryers elements of similarity theory are used. In the

general theory and practice of heat transfer, including the study of drying processes, about two dozen criteria are used. To assess the effectiveness of the walnut drying process, it is proposed, first of all, to use the criteria of Nusselt and Reynolds. Comparison of similar criteria of two (or more) processes or structural elements can give a decision on the feasibility of using a certain element of the system.

Keywords: drying, walnut, efficiency, process efficiency, moisture, thermal energy.

Відомості про авторів

Цуркан Олег Васильович – доктор технічних наук, професор кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету, директор Відокремленого структурного підрозділу «Ладизжинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» (вул. П. Кравчика, 5, м. Ладизжин, Вінницька обл., 24321, Україна, e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7218-0026>).

Спірін Анатолій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, викладач відокремленого структурного підрозділу «Ладизжинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету», (вул. П. Кравчика, 5, м. Ладизжин, Вінницька обл., 24321, Україна, e-mail: spirinanatoly16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4642-6205>).

Руткевич Володимир Степанович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380962700443, e-mail: v_rut@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6366-7772>).

Дідик Андрій Михайлович – аспірант кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380972830537, anddidyk99@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>).

Tsurkan Oleh – D.Eng.Sc., professor of the Department of technological processes and equipment of processing and food industries of Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University, director of Separated structural unit «Ladyzhyn Professional College of Vinnytsia National Agrarian University» (5, P. Kravchyka St., Ladyzhyn, Vinnytsia region, 24321

Spirin Anatoly - candidate of technical sciences, associate professor, teacher of Separate structural subdivision «Ladyzhyn vocational college of Vinnytsia National Agrarian University» (Kravchik Petro St., 5, Ladyzhyn, Vinnytsia Region, Ukraine, 24321, e-mail: spirinanatoly16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4642-6205>).

Rutkevych Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (Soniachna St. 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380962700443, e-mail: v_rut@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6366-7772>).

Didyk Andrii – postgraduate student of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agro-Industrial Complex of the Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sunny Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380972830537, anddidyk99@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>)