

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА КАМЕРНА СУШАРКА З КОМБІНОВАНИМ НАГРІВАННЯМ ТЕПЛОНОСІЯ

Ж. О. Петрова, доктор технічних наук, професор

В. М. Вишневський, доктор філософії

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: vit.vishnevsky@i.ua

Анотація. *Камерні сушарки широко використовуються в переробці овочів та фруктів в Україні, США, Китаї, Франції та в ін. країнах. Вони призначені для сушіння кускових (штучних) продуктів (хліб, нарізані овочі та фрукти тощо). Камерна сушарка – це поєднання одного або більше шаф сушарки в послідовному розташуванні. У двозонній камерній сушарці можна проводити сушіння великих обсягів сировини, яка споживає менше енергії порівняно з потужністю, яку має кожна сушильна шафа при окремій її експлуатації. Але високі енергетичні витрати на процес сушіння матеріалів при великих цінах на пальне спонукають вирішувати завдання підвищення енергоефективності при створенні нових камерних сушарок із застосуванням електронагрівачів теплоносія.*

В Інституті технічної теплофізики НАН України запропоновано використовувати парові теплогенератори в роботі багатозонної тунельної сушарки, що порівняно з теплогенераторами на органічному паливі дають можливість економити витрати теплоти в 1,7 – 2,3. Енергетичні витрати теплоти в тунельній сушарці складають 3800 кДж/кг випареної вологи.

Для зменшення енергетичних витрат набули поширення сонячні тунельні сушарки зі збільшенням поверхні теплообміну за рахунок максимального розведення піддонів з сировиною під різним кутом. За рахунок впливу сонячної енергії температура сушильного агенту може досягати 70 °С.

Основним напрямком розвитку сушіння рослинних матеріалів є поєднання існуючих технологій з відновлювальними джерелами енергії, зокрема використання сонячної енергії, теплових насосів, а також мікрохвильового, інфрачервоного та сублімаційного сушіння.

Комбінована технологія сушіння - це поєднання двох або більше різних процесів сушіння, які можуть забезпечити синергетичний ефект, що призводить до зменшення потреби в енергії та скорочення часу сушіння при збереженні більшості характеристик якості, наприклад, смаку, поживних речовин, кольору, аромату, текстури тощо.

Розглянуті різні методи комбінованого сушіння, такі як сонячно-інфрачервона, конвективно-інфрачервона, інфрачервона-мікрохвильова, конвективно-мікрохвильова та багатофункціональна, яка поєднує в собі мікрохвильове-сублімаційне сушіння під вакуумом. Порівняння комбінованих методів показало

значне зниження тривалості сушіння та зменшення енерговитрат, що може бути використано при проектуванні тунельних енергоефективних сушарок.

Ключові слова: *енергоефективні способи сушіння, тепломасообмін, теплофізичні властивості, товстоплівкові нагрівальні елементи, інфрачервоне випромінювання, комбіноване сушіння*

Актуальність. Процеси сушіння відносяться до складних енергоємних технологічних процесів, в кожному конкретному випадку необхідно зберігати біологічну активність, харчові властивості сировини, бактеріальні вимоги до продукту. Для галузей, які використовують процеси сушіння, характерні розсереджуване енергоспоживання та низький ККД використання енергії близько 40 – 50 %. [1] Огляд обладнання для сушіння рослинної сировини показує, що є значна кількість сушильних установок, серед них домінуючі камерні сушильні установки. Не дивлячись на різні комбінації методів сушіння при цьому досить високе споживання теплової енергії, яке становить 6440 – 15660 кДж/кг випареної вологи. Аналіз літературних джерел сучасних сушильних установок із комбінованим нагріванням теплоносія показує, що для підвищення енергоефективності сушильних установок використовують комбінацію конвекції та інфрачервоного випромінювання, мікрохвиль та інфрачервоного випромінювання, сонячної енергії та інфрачервоного випромінювання. Такі установки є лабораторного типу. У світі немає сушильних установок, в яких для підвищення енергоефективності застосовуються товстоплівкові нагрівальні елементи із комбінацією інфрачервоного випромінювання. Тому є необхідною розробка енергоефективної камерної сушарки із комбінованим нагріванням теплоносія промислового типу для широкого використання її у фермерських господарствах із завантаженням 120 кг сировини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В Україні головні галузі промисловості, в яких найбільше використовуються сушильні установки, це агропромисловий комплекс, хіміко-фармацевтична, будівельна індустрія, паливна та деревопереробна. Важливим чинником є їх енергоефективність та екологічна безпека. Агропромисловий комплекс (АПК) традиційно відіграє в Україні важливу роль. Він включає в себе сільське господарство та харчову промисловість.

У сільському господарстві велика кількість сушильних установок використовується для сушіння зерна. Актуальність проблеми енергозбереження при зневодненні зерна пов'язана із великими об'ємами врожаю 60 – 66 млн. т на рік. Від 50 до 80 %, а при несприятливих погодних умовах навіть 100 % щорічно вирощеного врожаю зерна підлягає сушінню. Питомі витрати умовного палива на сушіння однієї планової тони при зниженні вологості зерна від 20 до 14 % складають 14 – 18 кг умовного палива, а електроенергії 2,5 – 3,2 кВт, тобто загальні витрати перевищують 18 кг умовного палива або більше 5000 кДж на кг випареної води, чим і обумовлено низький ККД. Витрати енергії на сушіння при цьому в Україні становлять біля 0,5 млн тони умовного палива (т.у.п.). При цьому в навколишнє середовище надходить біля 3 млн т водяної пари.

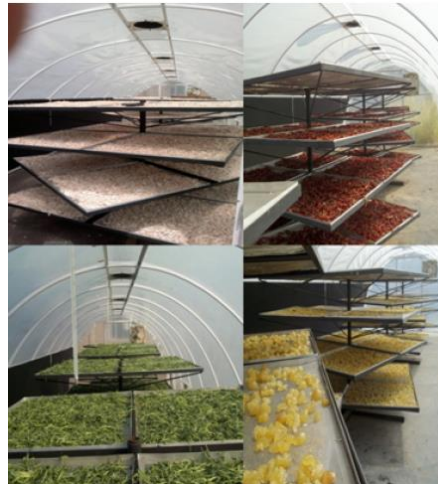


Рис. 1. Сонячна тунельна сушарка в умовах повного завантаження при завантаженні часником, перцем чилі, пажитником та агрусом амла

Ефективність сонячної тунельної сушарки оцінювали для сушіння часнику, чилі, пажитника та цукерок аонли відповідно до їх наявності. На сушіння продуктів пішло 4-8 днів. Температура в тунелі завжди була вищою, ніж стартові умови. На рис. 1. показана сонячна тунельна сушарка в умовах повного завантаження [2,3].

Мета дослідження - підвищення енергоефективності сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів в енергоефективній камерній сушарці шляхом застосування рециркуляції теплоносія та встановлення між зонами сушіння нових нагрівальних електричних елементів.

Матеріали і методи дослідження. При проведенні досліджень застосували експериментальні методи з використанням сучасних засобів вимірювання параметрів сушіння: часу проведення досліду, температури теплоносія та зменшення маси матеріалу за допомогою автоматизованої системи збору та обробки інформації в розробленій програмі "Sooshka", на спеціально спроектованому та вдосконаленому стенді для сушіння. Для обробки експериментальних даних використовувались методи математичного планування експерименту, а отримані дані оброблялися в інтегрованій системі Excel. Для оцінки якості матеріалу використані стандартні методи досліджень. Теоретичні дослідження проведені з використанням методів, що ґрунтуються на основних положеннях теорії тепло- і масообміну, теорії подібності, що оброблялись за допомогою комп'ютерних технологій.

Результати досліджень та їх обговорення. Сушіння відноситься до енергоємних процесів. На випаровування вологи в процесі сушіння витрачається 40 % енергії, а загальні втрати понад 50 %. Тому стоїть завдання підвищення енергоефективності процесу та обладнання. У нас в інституті ведуться дослідження з інтенсифікації процесу сушіння. Існує багато способів інтенсифікації сушіння, але ми в роботі використали комбінований спосіб сушіння. В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблений експериментальний конвективний стенд для визначення кінетики сушіння, який складається з таких основних частин: сушильної камери, системи нагрівання та подачі вентилятором теплоносія в камеру сушки, ізольованих повітропроводів. Для створення енергоефективної камерної сушарки з комбінованим нагріванням теплоносія було проведено вдосконалення експериментального конвективного стенду (рис.2) [4], шляхом встановлення в сушильну камеру блоку джерела інфрачервоного випромінювання з можливістю регулювання теплового потоку до 3800 Вт/м^2 . Зміна потужності ламп відбувається регулятором реостатного типу [5-7].



а



б

Рис. 2. Сушіння капусти білокачанної від інфрачервоних ламп в сушильній камері:

а – сушильна камера, б – кошик з нарізаною білокачанною капустою

Для інтенсифікації процесу застосовуємо комбіновану дію конвективного та інфрачервоного випромінювання при температурі теплоносія 60 °С, що прискорює процес на 80 хв при збереженні якості матеріалу (рис. 3).

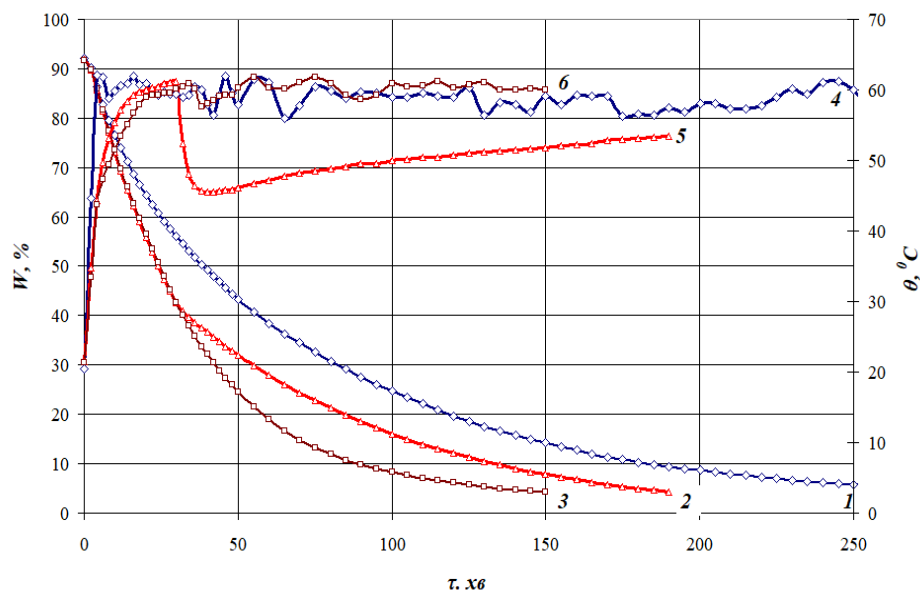


Рис. 3. Вплив інфрачервоного випромінювання та конвективного сушіння на тривалість сушіння капусти білокачанної, $V = 3$ м/с, $\delta = 15$ мм, $d = 10$ г/кг с.п.:

1,4 – інфрачервоне випромінювання; 2,5 – інфрачервоне випромінювання 30 хв + конвективне сушіння; 3,6 – інфрачервоне випромінювання + конвективне сушіння.
1,2,3 – зміна вологовмісту; 4,5,6 – зміна температури

Крива 1,4 (інфрачервоне випромінювання) характеризується найбільшою тривалістю сушіння 250 хв, матеріал має явно виражені ознаки підгорілого. Крива 3,6 (інфрачервоне випромінювання + конвективне сушіння) характеризується найменшою тривалістю сушіння в порівняно з іншими методами і становить 150 хв,

матеріал також має ознаки підгорілого. Крива 2,5 (конвективне сушіння + ІЧВ з тривалістю 30 хвилин і з подальшим відключенням). Після вимкнення ІЧВ температура в матеріалі знижується на 12 °С від 60 °С до 48 °С. За час використання ІЧВ (30 хв) зразок втратив 50 % своєї маси. За тривалістю сушіння цей спосіб поступається способу конв. + ІЧВ на 30 хв, але випереджає ІЧВ спосіб на 70 хв, капуста має кращу якість та не має ознак згорілого.

Температура нагрівання матеріалу в різних режимах сушіння не перевищувало 60 °С. Стрибки температур нагрівання капусти при інфрачервоному випромінюванні пов'язані з інерційністю випромінювання інфрачервоних ламп.

Сушіння білокачанної капусти при інфрачервоному випромінюванні істотно впливає на якість матеріалу, в зв'язку з тим, що він нагрівається безпосередньо і тому підгорає. Згідно проведених досліджень доцільно використовувати комбінований метод інфрачервоного випромінювання та конвективного сушіння.

Для зменшення впливу інфрачервоного випромінювання при комбінованому методу сушіння зменшуємо тривалість до 30 хв, що зберігає якість матеріалу [8, 9].

У сушильних установках широко використовують трубчасті електронагрівачі ТЕНи. В основі їх конструкції знаходяться провідники з високим опором і температурою плавлення (вольфраму, ніхрому та ін. сплавів), які запресовані в діелектричний шар і поміщені в металеву трубку. Така конструкція нагрівального елемента має ряд суттєвих недоліків:

- погана теплопередача від нагрівального провідника до поверхні ТЕНа, що призводить до його перегрівання та як наслідок до швидкого зношування;
- слабкий захист провідника від контактування із повітрям, що призводить до його окислення та виходу з ладу;
- відбувається вигорання кисню в результаті контактування перегрітого провідника із повітрям;
- невисока питома потужність розсіювання тепла.

Використані нами в камерній сушарці новітні перетворювачі електричної енергії в теплову, розроблені ДП «Інженерний Центр Сушка» ІТТФ НАНУ, мають

кращу енергетичну ефективність та є оптимальними нагрівальними елементами для конвективних сушарок.

В основі нагрівального елемента є розроблена система різних за своїми властивостях композиційних наноструктурних матеріалів – паст.

На базі цієї системи матеріалів створена технологія виробництва нових нагрівальних елементів з унікальними можливостями.

Виготовлені за інноваційною технологією нагрівачі являють собою металеву основу із діелектричним покриттям товщиною 1-8 мм практично будь якої геометричної конфігурації. На металевій основі типографічним способом резистивною пастою наноситься струмопровідний рисунок, що представляє собою контур опору електричного кола, що надійно ізолюваний як від основи, так і від навколишнього середовища.

Технічні характеристики нагрівальних елементів:

- основа нагрівачів – нержавіюча сталь типу AISI 430, аналог 12X17 або кераміка типу ВК 94;
- композиційні пасти - ТУ У 24.7-14307699-001-2003 діелектрична, резистивна, контактна;
- напруга живлення від 1,5 В до 720 В як змінного, так і постійного струму;
- питомий поверхневий опір резистивного шару Ом/квадрат – 0,05-50;
- зміна опору в процесі експлуатації за 10000 годин - не більше 5 %;
- пробивна напруга – не менше 1250 В;
- максимальна питома потужність розсіювання до – 50 Вт/см²;
- максимальна робоча температура – 500 °С.

Переваги нагрівачів:

- зменшене енергоспоживання;
- надійність;
- саморегулювання споживаної потужності;
- низька теплова інерційність;
- направлене теплове випромінювання;
- рівномірне нагрівання;

- універсальність;
- висока технологічність.

- Камерна сушарка (рис. 4.) складається із сушильної камери (1), в яку заїжджають два візки (5,7). Корпус, в свою чергу, поділяється на внутрішній та зовнішній. Сушильна камера (1) ізолювана базальтовою ватою, товщина шару якої коливається від 0,2 до 0,35 м. Встановлений вентилятор відцентрового типу (2) (продуктивність 4000 м³/год, робочий тиск 360 Па) на вході в сушильну камеру. Для нагрівання теплоносія встановлені електричні товстоплівкові нагрівальні елементи (4, 6) загальною потужністю 42 кВт. Кабелі, які живлять нагрівальні елементи всередині камери, негорючого типу НГ із температурним допуском + 110 °С.

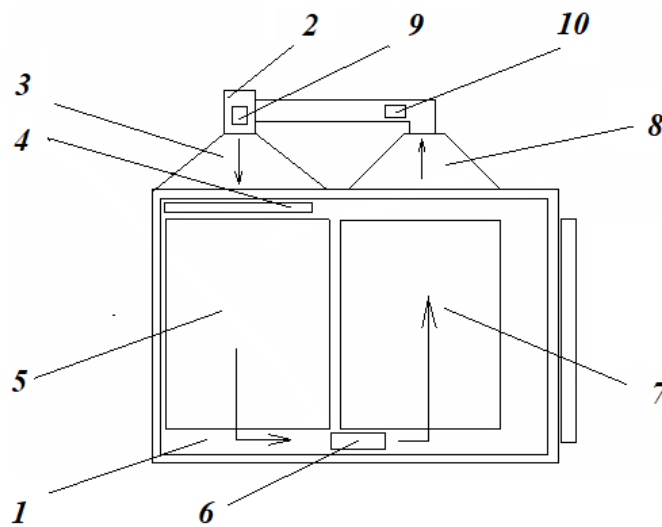


Рис. 4. Схема камерної сушарки:

1 – камера, 2 – відцентровий вентилятор, 3 – дифузор, 4 – перша батарея нагрівальних елементів, 5 – перший візок, 6 – друга батарея нагрівальних елементів, 7 – другий візок, 8 – конфузор, 9 – шибер, 10 - компенсуючий шибер

Для роботи камерної сушарки передбачені автоматичні пристрої для регулювання:

- температури теплоносія (реле температури ТК - 6);
- час роботи (реле часу Т - 2);
- швидкість руху теплоносія (частотний регулятор) .

У середині камери (1) також розміщені три реле для вимірювання вологості та температури РКВТ – 2/16. Вони розміщені на вході в сушарку теплового агента, між

візками та на виході із сушарки теплоносія. Для регулювання викиду відпрацьованого теплоагенту в камерній сушарці передбачені шибер (9) та компенсаційний шибер (10) для підводу свіжого повітря.

Розроблена нами сушарка являє собою камеру (1), в яку заїжджають два візки загальною площею сушіння 20 м^2 . Для збільшення ефективності всередині камери змонтовані нагрівальні елементи відповідно до руху теплового агента, нагрівальні елементи встановлені перед візками по всій їх висоті та розміщені навпроти піддонів. Відцентровий вентилятор (2) нагнітає повітря через дифузور (3) до першої батареї нагрівальних елементів (4), де воно нагрівається і потрапляє на перший візок (5). Після того, як тепловий агент проходить перший візок, він насичується випареною вологою із матеріалу, та його температура знижується. Після першого візка тепловий агент потрапляє на другу батарею нагрівальних елементів (6), де догрівається та проходить другий візок (7), ще більше насичуючись випареною вологою із матеріалу, і його температура знижується. Після другого візка тепловий агент, насичений вологою, через конфузор (8) потрапляє до вентилятора (2), який нагнітає його знову в камеру, але перед цим через шибер (9) певна кількість відпрацьованого теплоносія виводиться за межі сушарки через компенсуючий шибер (10) завдяки зоні розрідження, частково всмоктується свіже повітря. Таким чином, сушильна установка працює з частковою рециркуляцією теплоносія. Якщо шибери (9,10) зачинені, то сушарка працює з повною рециркуляцією теплоносія.

Товстоплівкові нагрівальні елементи (рис. 5, а) розміщені на протилежних стінках тунельної сушарки по 21 шт. Інфрачервоні випромінювачі (рис. 5, б) розміщені над піддонами.



а



б

Рис. 5. Нагрівальні елементи, які використані в камерній сушарці:
а – товстоплівковий нагрівальний елемент; *б* – інфрачервоний випромінювач

Оцінка якості сушарки оцінюється за її енергетичним ККД, який визначається співвідношенням корисної енергії до всієї витраченої на процес:

$$\eta = \frac{q_{\text{кор}}}{q_{\text{витр}}} . \quad (1)$$

Для будь якої сушильної установки використаною теплою потрібно вважати тільки ту теплоту, яка затрачена на випаровування вологи. Ця теплота (кДж/кг с.г.), віднесена до 1 кг сухого газу (повітря), записується у вигляді:

$$q_{\text{кор}} = r \frac{d_2 - d_1}{1000} , \quad (2)$$

де r – питома теплота пароутворення; вона приймається за середньою температурою матеріалу:

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2} . \quad (3)$$

Якщо матеріал висушується до низької вологості, враховується також величина Δr – витрата енергії на подолання зв'язку вологи з матеріалом.

Витрачена теплота для конвективних сушарок являє собою теплоту, що приймає 1 кг газу в калорифері:

$$q_{\text{витр}} = c_p (t_1 - t_0) . \quad (4)$$

Якщо рахувати на 1 кг випареної вологи, тоді:

$$\eta = \frac{r}{q_{\text{калориф}}} , \text{ або } \eta = \frac{r + \Delta r}{q_{\text{калориф}}} \quad (5)$$

де r – питома теплота пароутворення, 2400 кДж/кг для вільної вологи, +10 % для зв'язаної, що становить 2640 кДж/кг; $q_{\text{калориф}}$ – витрачена енергія, кДж/кг.

На рис. 6 представлена діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу та затрачена на неї енергія.

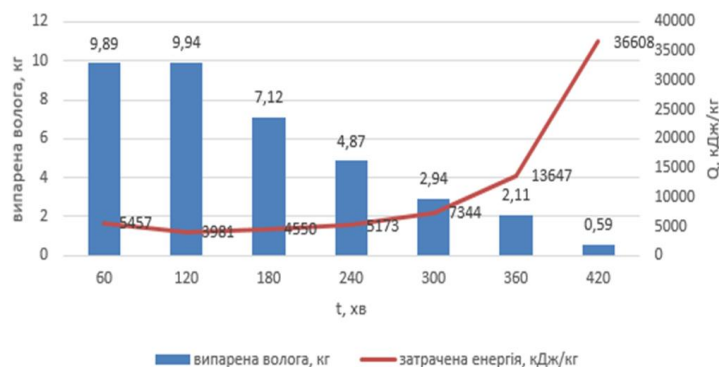


Рис. 6 Діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при завантаженні сушарки на 50 % і $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

Камерна сушарка була завантажена матеріалом на 50 % масою 45 кг. Тривалість процесу становила 420 хв. Із діаграми видно, що під час прогрівання матеріалу інтенсивно випарувалась волога в кількості 9,89 кг протягом 60 хв, при цьому було затрачено 5457 кДж/кг випаруваної вологи енергії, це свідчить що випаровувалася вільна волога. У наступні 60 хв був подібний процес, що свідчить також про випаровування вільної вологи. Процес інтенсифікується при випаровуванні вологи у кількості 9,94 кг, витрати енергії зменшились. Це пов'язано із тим, що на 120-ій хв процесу матеріал вже прогрівся і енергія витрачається лише на випаровування вільної вологи. На 180-ій хв починають зростати енерговитрати, а кількість випареної вологи зменшується. Це пояснюється тим, що вільна волога майже випарувалась. У подальшому з 240-ї хв відбувається процес видалення зв'язаної вологи, що характеризується зменшенням видаленої вологи до 4,87 кг, на яку витрачено 5173 кДж/кг енергії випаруваної вологи. У подальшому на діаграмі ми бачимо зменшення кількості випареної вологи та збільшення витрат енергії. Після 360-ї хв процес доцільно завершувати, тому що йде різке зростання енергетичних витрат при мінімальному видаленні вологи і подальший процес сушіння стає енергозатратний.

На рис. 7 представлена діаграма погодинних витрат енергії при завантаженості сушарки 100 % масою сировини 80 кг.



Рис. 7. Діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при завантаженні сушарки на 100% при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Характер зміни випаруваної вологи та затраченої енергії подібний до діаграми, яка представлена на рис. 6. Як видно з рис. 7, при більшому завантаженні інтенсивність процесу зростає, в результаті чого ми маємо менші витрати енергії на кілограм випареної вологи. На відміну від попередніх досліджень процес сушіння можна завершувати на 300-й хвилині, якщо нам потрібно отримати сухофрукти. Були проведені розрахунки погодинних витрат енергії та за увесь процес при завантаженні сушарки на 50 % масою сировини 45 кг (рис. 8).

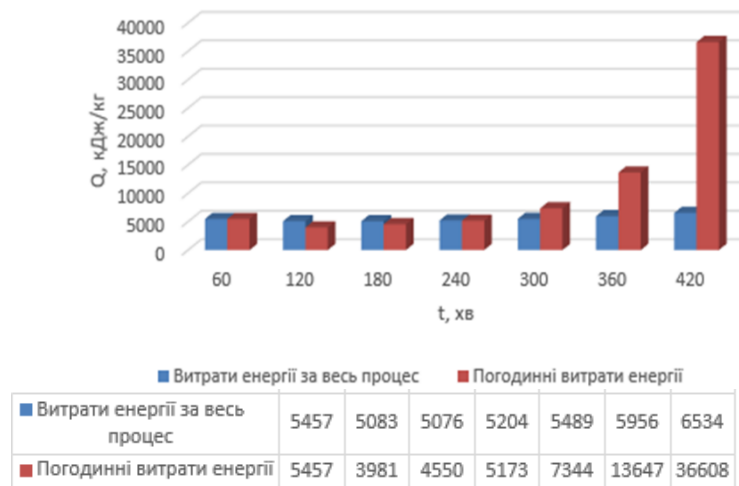


Рис. 8. Діаграма погодинних витрат енергії та за увесь процес із завантаженням сушарки на 50 % масою 45 кг сировини при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Із діаграми видно, що витрати енергії за весь процес склали 6534 кДж/кг випареної вологи.

Були проведені розрахунки погодинних витрат енергії та за увесь процес при завантаженні сушарки 100 % масою сировини 80 кг (рис. 9). Із діаграми видно, що витрати енергії за увесь процес склали 4742 кДж/кг випареної вологи. Порівняння загальних енергетичних витрат при завантаженні сушарки 45 кг та 80 кг показали, що енергоефективність сушарки підвищується при більшому завантаженні в 1,37 рази.

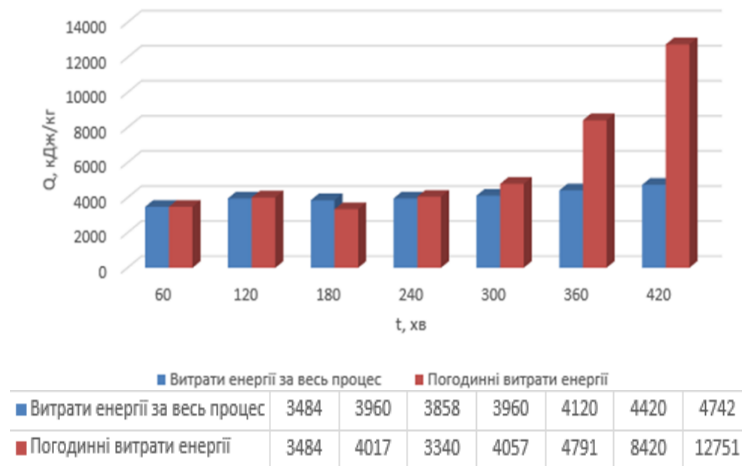


Рис. 9. Діаграма погодинних витрат енергії та за увесь процес із завантаженням сушарки 100 % масою сировини 80 кг при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Використовуючи формулу (5) був розрахований ККД сушарки. При завантаженні сушарки на 50 % та тривалості сушіння 420 хв ККД становить 45,5 %. При завантаженні сушарки на 100 % та тривалості сушіння 420 хв ККД становить 62,3 %. Оскільки при тривалості сушіння 360 хв вологість матеріалу становила 8 %, якої достатньо для отримання порошків, процес на цьому етапі доцільно завершити. ККД сушарки при цьому становитиме 63,4 %.

При виробництві порошків 80 % енергії затрачається на процес сушіння. Тому створення енергоресурсозберігаючої технології вимагає використання режимів сушіння і сушильних установок з мінімальними енергозатратами. Витрата теплоти на випарення 1 кг вологи з врахуванням ступеню насичення сушильного агента водяними парами в залежності від t_1 та t_2 показаний на рис. 10.

Із рисунку видно, що t_1 має основний вплив на питому витрату теплоти, яка прямо пропорційна термічному ККД. Так, при $t_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і насиченості 40 %, витрата теплоти $q = 5600\text{ кДж/кг}$, а при тій же насиченості, але при $t_1 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $q = 3700\text{ кДж/кг}$, або на 34 % менше. Отже, підвищення температурного рівня процесу сушіння з теплотехнічної точки зору є корисним [10].

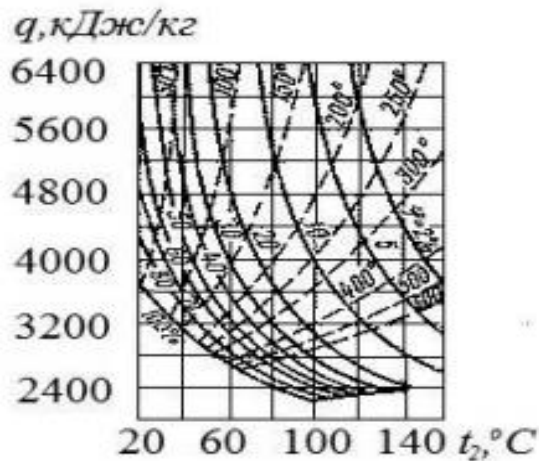


Рис. 10. Витрата теплоти на випарення 1 кг вільної вологи в теоретичній сушарці в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента t_2 – при різних вологостях сушильного агента (суцільні криві); при різних початкових температурах (пунктирні криві).

Вихідні розрахункові дані: температура повітря – 10 °С; вологість – 80 %; тиск – 98,0 кПа.

Висновки і перспективи. У статті представлені результати модернізації дослідного конвективно - сушильного стенду шляхом встановлення інфрачервоного випромінювання; розробки та випробування енергоефективної камерної сушарки з комбінованим нагріванням теплоносія з використанням в ній товстоплівкових нагрівальних елементів. Випробування в енергоефективній камерній сушарці товстоплівкових нагрівальних елементів показали, що на відміну від звичайних трубчастих ТЕНів за вимірювання споживання енергетичних витрат, вони мають кращу енергетичну ефективність та є оптимальними нагрівальними елементами для конвективних сушарок. Проведено порівняння двох способів сушіння в енергоефективній камерній сушарці, яке вказує на те, що інфрачервоне випромінювання при нагріванні матеріалу збільшує швидкість видалення вологи в 4,85 рази. Витрати енергії на 1 кг випареної вологи в створеній енергоефективній камерній сушарці відповідають ефективним показникам такого типу камерних сушарок і становлять 4742 кДж/кг вип. вологи. Дослідження показали доцільність використання та широкого впровадження в промисловості інфрачервоного випромінювання під час сушіння на початковому етапі з подальшим використанням конвективного нагрівання із застосуванням товстоплівкових нагрівальних елементів.

Список використаних джерел

1. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., Samoilenko, K. (2021). Blending and drying of antioxidant raw materials. Monograph. Vinnitsa: LLC «TVORY», 6-8.
2. Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sainz, C., Fito, P., Andres, A. (2008). Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, 85, 42-50.
3. Turhan, Mahir, K., Nazan Turhan., Ferhunde Sahbaz. (1997). "Drying kinetics of red pepper." *Journal of food processing and preservation*, 21(3), 209-223.
4. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Енергоефективне виробництво функціональних харчових порошків. Монографія. Вінниця: видавництво «РВВ ВНАУ», 2016. 458 с.
5. Petrova, Zh., Grakov, O., Vishnevsky, V. Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. С. 22 – 24
6. Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Вишнівський В.М., Граков О.П. Дослідження кінетики сушіння червонокочанної капусти на конвективній сушарці. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. С. 25-27.
7. Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Вишнівський В.М., Граков О.П. Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у конвективній сушильній установці. Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса: ОНТУ, 2022. С.14-16.
8. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M., Vishnevsky, V.M. Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. *Енергетика та автоматика*. 2020. № 6, ISSN 2223-0858.
9. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., Samoilenko, K., Vishnievsky, V., Grakov, O. Research of the Kinetics of the Drying Process of Combined Plant Materials. *Scientific Works*, 86(1), 69-76.
10. Снежкін Ю. Ф., Шапар Р.О. Енергоефективність процесів сушіння: Тематичний збірник статей у 2-х томах. Київ: Тропеа, 2021. Т.2. 268 с..

References

1. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu. & Samoilenko, K. (2021). Blending and drying of antioxidant raw materials. Monograph. Vinnitsa: LLC «TVORY», 6-8.
2. Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sainz, C., Fito, P. & Andres, A. (2008). Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, 85, 42-50.
3. Turhan, Mahir, K., Nazan Turhan. & Ferhunde Sahbaz. (1997). "Drying kinetics of red pepper." *Journal of food processing and preservation*, 21(3), 209-223.

4. Snezhkin, Yu.F., Petrova, Zh.O. & Pazyuk, V.M. (2016). Enerhoefektyvne vyrobnytstvo funktsionalnykh kharchovykh poroshkiv [Energy-efficient production of functional food powders]. Monograph. Vinnytsia: publishing house «RVV VSAU», 458.

5. Petrova, Zh., Grakov, O. & Vishnevsky, V. (2021). Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Collection of abstracts of reports of the 20th international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Resource-energy-saving technologies and equipment". Kyiv: "KPI named after Igor Sikorsky", 22-24

6. Petrova, Zh.O., Slobodyaniuk, K.S., Vyshnevskiy, V.M. & Grakov O.P. (2022). Doslidzhennia kinetyky sushinnia chervonokachannoi kapusty na konvektyvnii sushartsi [Study of drying kinetics of red cabbage on a convective dryer]. Collection of abstracts of reports of the 20th international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Equipment of chemical production and building materials enterprises". Kyiv: "KPI named after Igor Sikorsky", 25-27.

7. Petrova, Zh.O., Slobodyaniuk, K.S., Vyshnevskiy, V.M. & Grakov, O.P. (2022). Doslidzhennia kinetyky sushinnia koloidnykh kapiliarno-porystykh materialiv u konvektyvnii sushylnii ustanovtsi [Study of drying kinetics of colloidal capillary-porous materials in a convective drying unit]. Collection of abstracts of reports of the 19th International Scientific Conference "Improvement of processes and equipment of food and chemical industries". Odesa: ONTU, 14-16.

8. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M. & Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. Enerhetyka ta avtomatyka, 6, ISSN 2223-0858.

9. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., Samoilenko, K., Vishnievsky, V. & Grakov, O. Research of the Kinetics of the Drying Process of Combined Plant Materials. Scientific Works, 86(1), 69-76.

10. Snezhkin, Y.F. & Shapar, R.O. (2021). Enerhoefektyvnist protsesiv sushinnia [Energy efficiency of drying processes: Thematic collection of articles in 2 volumes]. Kyiv: Tropea. Vol. 2, 268.

ENERGY-EFFICIENT CHAMBER DRYER WITH COMBINED HEATING HEAT TRANSFER

Zh. Petrova, V. Vyshnevskiy

Abstract. Chamber dryers are widely used in the processing of vegetables and fruits in Ukraine, the USA, China, France, etc. They are intended for drying lumpy (artificial) products (bread, chopped vegetables and fruits, etc.). A chamber dryer is a connection of one or more dryer cabinets in location mode. In a 2-zone chamber dryer, it is possible to dry large volumes of raw materials, which consumes less energy compared to the power that the entire drying cabinet has when it is operated separately. But high energy costs for the process of drying materials with high prices for the second encourage to solve the task of increasing energy efficiency when creating new chamber dryers using electronic heaters of the coolant.

The Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine suggests using steam heat generators in the operation of a multi-zone tunnel dryer, which, in comparison with organic fuel heat generators, make it possible to save

heat consumption by 1.7-2.3 times compared to existing analogues. Energy consumption of heat in the tunnel dryer is 3800 kJ/kg of evaporated moisture.

To reduce energy costs, solar tunnel dryers with an increase in the heat exchange surface due to the maximum separation of pallets with raw materials at different angles have become widespread. Due to the influence of solar energy, the temperature of the drying agent can reach 70 °C.

The main direction of the development of drying plant materials is the combination of existing technologies with renewable energy sources, in particular the use of solar energy, heat pumps, as well as microwave, infrared and sublimation drying.

Combined drying technology is the combination of two or more different drying processes that can provide a synergistic effect, resulting in reduced energy requirements and reduced drying time while maintaining most of the quality characteristics, such as taste, nutrients, color, aroma, texture, etc.

Different methods of combined drying are considered, such as: solar-infrared, convective-infrared, infrared-microwave, convective-microwave and multifunctional, which combines microwave-sublimation drying under vacuum. The comparison of the combined methods showed a significant decrease in the duration of drying and a reduction in energy consumption, which can be used in the design of tunnel energy-efficient dryers.

Key words: *energy-efficient methods of drying, heat and mass transfer, thermophysical properties, thick-film heating elements, infrared radiation, combined drying*