

НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ В ТУНЕЛЬНИХ ТА КОМБІНОВАНИХ СУШАРКАХ

Ж.О. Петрова, В.М. Пазюк, В.М. Вішнівський, Д.П. Граков

Наведено класифікацію тунельних сушарок; розглянуто чинники, що впливають на інтенсивність та енергоефективність процесу. Основними параметрами визначено температуру теплоносія, швидкість руху теплоносія, вологість сушильного агента і напрямок продування матеріалу в тунельних сушарках.

Запропоновано використовувати парові теплогенератори в роботі багатозонної тунельної сушарки, що порівняно з теплогенераторами на органічному паливі дають можливість зменшити витрати теплоти в 1,7–2,3 разу порівняно з існуючими аналогами. Енергетичні витрати теплоти в тунельній сушарці становлять 3800 кДж/кг випареної вологи.

Для зменшення енергетичних витрат застосовуються сонячні тунельні сушарки зі збільшенням поверхні теплообміну за рахунок максимального розведення піддонів із сировиною під різним кутом. Завдяки впливу сонячної енергії температура сушильного агента може досягати 70 °С.

Основним напрямом розвитку сушіння рослинних матеріалів є поєднання існуючих технологій з відновлюваними джерелами енергії, зокрема використання сонячної енергії, теплових насосів та мікрохвильового, інфрачервоного і сублімаційного сушіння.

Комбінована технологія сушіння – це поєднання двох або більше різних процесів сушіння, які можуть забезпечити синергетичний ефект, що приводить до зменшення потреби в енергії та скорочення часу сушіння зі збереженням більшості характеристик якості, зокрема смаку, поживних речовин, кольору, аромату, текстури тощо.

Розглянуто різні методи комбінованого сушіння, такі як сонячно-інфрачервоне, конвективно-інфрачервоне, інфрачервоно-мікрохвильове, конвективно-мікрохвильове та багатофункціональне, що поєднує в собі мікрохвильове та сублімаційне сушіння під вакуумом. Порівняно із сублімаційним, сублімаційне мікрохвильове вакуумне сушіння зменшує час обробки продуктів на 75% та споживання енергії на 72% відповідно.

Поєднання комбінованих методів значно зменшує тривалість сушіння та енерговитрати, що може бути використано під час проектування тунельних енергоефективних сушарок.

Ключові слова: тунельна сушарка, енергоефективність, класифікація, тепловий насос, метод сушіння.

DIRECTIONS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE DRYING PROCESS IN TUNNEL AND COMBINED DRYERS

Zh. Petrova, V. Paziuk, V. Vishnevsky, D. Grakov

The article presents the classification of tunnel dryers and considers the factors influencing the intensity and energy efficiency of the process. The main parameters are the temperature of the coolant, the velocity of the coolant and the humidity of the drying agent, as well as the direction of blowing the material in the tunnel dryers.

The Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine proposes to use steam heat generators in the operation of a multi-zone tunnel dryer, which in comparison with heat generators on organic fuel allows to save heat costs by 1.7–2.3 times compared to existing counterparts. Energy heat consumption in the tunnel dryer is 3800 kJ/kg. moisture.

To reduce energy costs, solar tunnel dryers with an increase in heat transfer surface due to the maximum dilution 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 development of drying of 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 freeze drying.

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

Various 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. Compared to freeze-drying, freeze-drying microwave vacuum drying reduces drying time by 75% and energy consumption by 72%, respectively.

Comparison of combined methods significantly reduces the drying time and reduces energy consumption, which can be used in the design of tunnel energy efficient dryers.

Keywords: *tunnel dryers, energy efficiency, classification, heat pumps, drying methods.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Тунельні сушарки широко використовуються в переробці овочів та фруктів в Україні, США, Китаї, Франції та інших країнах. Вони призначені для сушіння кускових (штучних) продуктів (хліб, нарізані овочі та фрукти, яблучні вичавки та ін.) [1].

Тунельні сушарки дозволяють плавно регулювати режими сушіння з отриманням високої якості матеріалу. Використання комбінованих способів сушіння дозволяє зменшити енергетичні витрати на процес сушіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації із підвищення енергоефективності процесу за рахунок комбінованих способів сушіння, що в основному проводилось на лабораторних установках.

Серед заходів підвищення енергоефективності, запропонованих авторами публікацій, є використання комбінованих способів сушіння. Зокрема розглядаються напрями із застосування сонячної енергії, теплових насосів, мікрохвильове, інфрачервоне та сублімаційне сушіння.

Мета статті – проведення аналізу та систематизації енергоефективних методів та установок для сушіння та адаптування цих методів в тунельних сушарках.

Виклад основного матеріалу дослідження. Тунельна сушарка – це поєднання двох або більше шаф сушарки, послідовно розташованих усередині тунелю. У тунельних сушарках можна сушити великі обсяги сировини. Така сушарка споживає менше енергії порівняно з енергією, яку витрачає кожна сушильна шафа в разі окремої її експлуатації.

Класифікувати тунельні сушарки можна таким чином:

1. За способом подачі сушильного агента в робочий канал сушарки поділяються:

- на прямооточній – потік теплоносія переміщується паралельно руху візків із сировиною, температура теплоносія максимальна на вході в сушильний канал;

- протитечій – теплоносій рухається назустріч візкам із сировиною, максимальна температура реєструється на виході візків із сушарки;

- комбіновані – прямооточно-протиточні двозонні сушарки;

- із перехресним потоком теплоносія – потік направлений перпендикулярно руху продукту, теплоносій у кожній зоні циркулює автономно, підтримуючи задані параметри.

2. За організацією сушильного процесу:

- викид відпрацьованого сушильного агента назовні;

- із рециркуляцією сушильного агента;

- із розподіленою подачею сушильного агента;

- із додатковим підігріванням сушильного агента в сушильній камері.

3. За способом нагрівання сушильного агента:

- з електричними нагрівачами;
- вогневими калориферами;
- паровими калориферами;
- водяними калориферами.

4. За кількістю сушильних зон:

- однозонні;
- багатозонні.

5. За видом сушильного агента:

- повітряні;
- газові;
- газоповітряні;
- парові.

6. За режимом роботи сушильної установки:

- періодичної дії;
- безперервної дії;
- циклічної дії.

Перевагою тунельних сушарок є простота конструкції, надійність в експлуатації й універсальність, а також наявність власних вбудованих теплогенераторів, які працюють на рідкому паливі, що виключає необхідність будівництва котельень.

Основним недоліком є використання ручної праці під час завантаження піддонів із матеріалом; використання топкових газів, що може спричинити утворення канцерогенних речовин; паралельний рух повітря і матеріалу, при цьому зменшується контакт і теплообмін між ними.

Різні дослідники вивчали сушіння в тунелях, зокрема Касерес-Уамбо та Менегаллі [1] працювали над моделюванням та оптимізацією напівнеперервних тунельних сушарок для фруктів, Маруліс та Саравакос [2] також працювали над моделюванням та проектуванням процесів сушіння, Чоу та ін. [3] досліджували сушіння харчового продукту в тунельній сушарці, Ajala et al. [4] працювали над статистичним моделюванням та моделюванням процесу сушіння в тунелях. Однак, за даними Nindo et al. [5] та Abonyi et al. [6], ефективність тунельної сушарки становить 38–42%.

На рис. 1 наведено схему тунельної сушарки з розподіленням повітря, що складається з вентилятора, підігрівача, тунелю, яким рухаються візки. Візки рухаються протитечею із напрямком руху нагрітого повітря, що значно інтенсифікує процес.

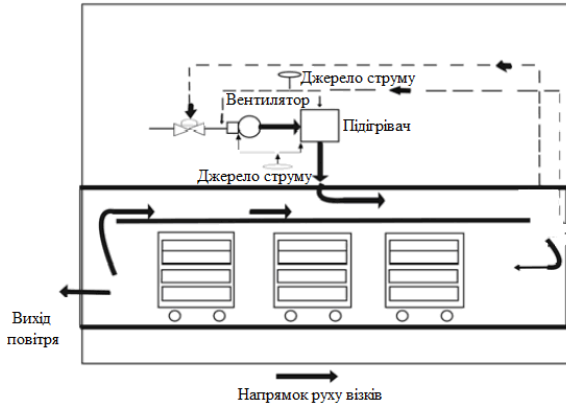


Рис. 1. Схема тунельної сушарки з розподіленням повітря

Досліджуючи процес сушіння в цій сушарці (рис. 2), особливу увагу приділяли впливу факторів на тривалість сушіння, зокрема впливу відносної вологості повітря, швидкості руху повітря та температури теплоносія.

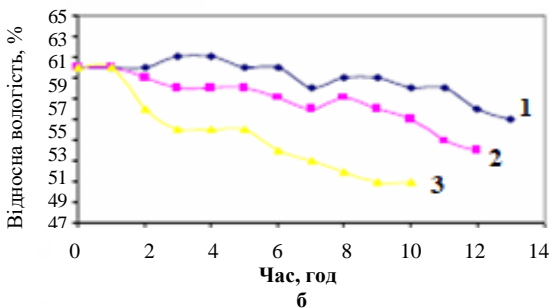
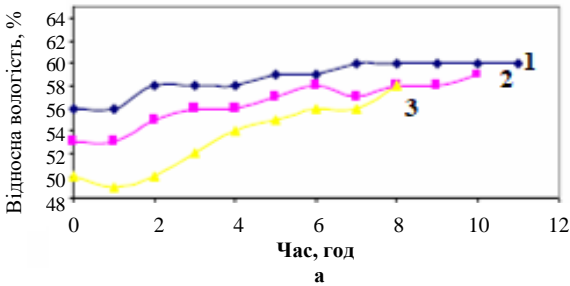


Рис. 2. Вплив відносної вологості повітря на тривалість сушіння в тунельній сушарці при прямотечії (а) та протитечії (б) в сушильній камері під час сушіння чипсів із маніоки: 1 – 60 °С, 2 – 70 °С, 3 – 80 °С

Досліджуючи процес сушіння рослинних матеріалів у тунельних сушарках, науковці визначали такі фактори:

1. Вплив відносної вологості повітря на тривалість сушіння.

На рис. 2а, видно, що вологість зростала, коли візок переходив із менш холодного кінця на гарячий кінець. Це пов'язано з тим, що, коли свіжий матеріал прямував до гарячого кінця, швидкість видалення вологи була більшою, тому підвищилася вологість повітря. На відміну від цього, на рис. 2б показано, що при прямотечії вологість зменшується із часом сушіння.

Вологість повітря впливала на сушіння, оскільки чим вища вологість повітря, тим більша тривалість сушіння. Цей ефект спостерігався в дослідженнях Касерес-Уамбо та Менегаллі [1]. Інша функція відносної вологості повітря полягає в тому, що збільшення цієї вологості зменшило б градієнт тиску водяної пари між поверхнею матеріалу та навколишнім повітрям, тим самим зменшуючи швидкість зовнішнього масообміну. На відміну від цього, зменшення відносної вологості повітря в сушарці збільшить градієнт між поверхнею матеріалу та навколишнім повітрям, а отже, і швидкістю сушіння [7].

2. Вплив швидкості руху повітря на тривалість сушіння.

Деякі зарубіжні дослідники вивчали вплив швидкості руху повітря на швидкість висихання різних зразків матеріалу (Ajala et al. [8], Kashaninejad et al. [9], Bullent et al. [10], Marque et al. [11] та Nurul-Asyikin et al. [12]). У цих дослідженнях повідомлялося, що швидкість повітря не впливає на тривалість сушіння так сильно, як температура. Однак Касанінежад та ін. [9] установили, що вплив швидкості руху повітря був більш вираженим у разі низької температури сушіння (при 25 °C або нижче).

3. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння.

Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння в тунельній сушарці показано на рис. 3а та 3б. Бачимо, що на висушування 2 кг стружки за температури 60 °C в протитечійному режимі пішло 11 год, а для висушування тієї самої маси при 60 °C в прямотечійному режимі – 13 годин.

У разі противотечії сушіння займає зазвичай менше часу, ніж за умов прямотечії, це підтвердило роботу дослідників Sing and Heldman [13]. Кінетика значною мірою залежить від температури харчових продуктів, як повідомляють Ajala et al. [14]. Температура всередині продукту змінює активність води і впливає на інші чинники, такі як приховане тепло випаровування вологи, яке змінюється залежно від температури. Підвищення температури повітря покращує сушіння, впливаючи як на зовнішні, так і на внутрішні механізми руху вологи. Однак занадто високі температури можуть спричинити погіршення якості продукту.

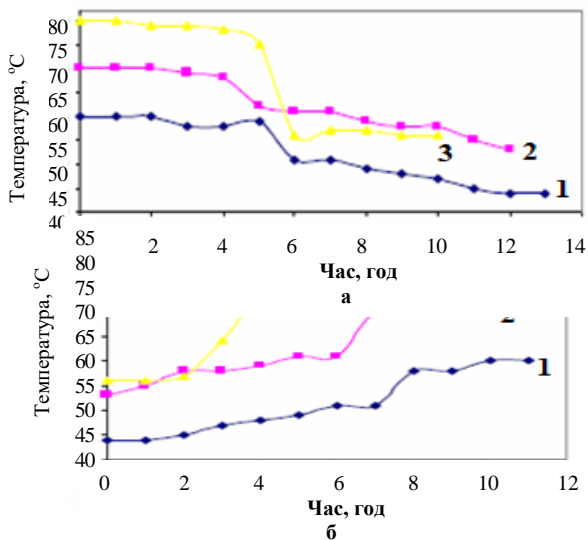


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння в тунельній сушарці при прямиотечії (а) та противотечії (б) у сушильній камері під час сушіння чипсів із маніюки: 1 – 60 °С; 2 – 70 °С; 3 – 80 °С

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено парову сушильну установку тунельного типу, що може складатися з однієї, двох, трьох або п'яти сушильних зон, кількість яких визначається її продуктивністю та зоною охолодження. Кожна сушильна зона має дві напівзони. У кожній напівзоні парових сушарок розміщуються по два візки. У зоні охолодження розміщується один візок (рис. 4) [15].

Сушарка складається зі збірних металевих секцій, які утворюють тунель з зонами. Зовнішні стіни корпусу сушарки можуть виготовлятися із цегли. Корпус (тунель) складається із трьох зон сушіння і зони охолодження. Для циркуляції теплоносія кожна зона має вентиляційний агрегат, установлений поза цехом.

Внутрішні стіни тунелю в сушильних зонах утворені секціями парових калориферів. Кожна зона складається з двох напівзон. Усередині тунелю на вході та виході, а також на межі напівзон встановлені ущільнення, які за наявності візків у тунелі забезпечують направлений рух теплоносія. Під час переміщення візків уздовж тунелю вони обдуваються по чергово з протилежних боків, що забезпечує рівномірне сушіння продукту по ширині візка. Для забезпечення рівномірного сушіння (охолодження) продукту по висоті візка в дифузори, через який теплоносій (охолоджувач) надходить у зону, установлені розподільчі пластини.

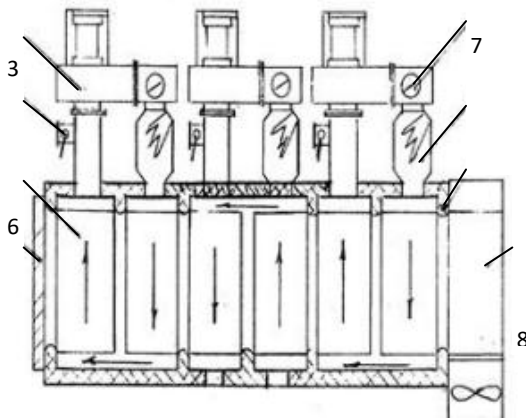


Рис. 4. Сушарка тризонна парова ТФ.4.10: 1 – сушильна зона; 2 – ворота сушарки; 3 – вентилятор сушарки; 4 – теплогенератор; 5 – ущільнення; 6 – засувка з біофільтром; 7 – засувка вихлопна; 8 – зона охолодження

Усередині тунелю покладено рейки, які замикаються поза зоною тунелю. На поворотах рейкового шляху встановлено обертові круги. Напівзона – металоконструкція з теплоізоляційними щитами на зовнішніх поверхнях. Усередині напівзони встановлені з двох боків чотири калорифери, які утворюють внутрішні стіни. Зовнішні місця стику напівзон закриваються планками. На вході в тунель встановлені ворота з механізмом закриття та відкриття. На повітропроводах, які зв'язують вентиляторний агрегат із зоною, у якій встановлені засувки для подачі свіжого повітря та часткового викиду відпрацьованого теплоносія.

Візок – рамна металоконструкція, на якій встановлюються 40 рядів піддонів (по чотири в кожному ряду).

Механізм руху візків – ланцюговий штовхач. Натягування ланцюга штовхача відбувається натяжним валом. На ланцюговому штовхачі встановлений упор, який діє на кінцевий вимикач для зупинення штовхача у вихідному положенні.

Пара до установки підводиться від цехової магістралі. На підвідному паропроводі встановлено регулятор тиску. На паропроводах, які підводять пару до калориферів кожної напівзони, встановлено автоматичний регулятор витрати пари. У системі підведення конденсату з калориферів кожної напівзони передбачені конденсатовідвідник, зворотний клапан.

Перевагою парових сушарок є універсальність, автоматизоване керування, екологічність, менші енерговитрати порівняно з використанням теплогенераторів на органічному паливі. Недоліком є інтенсивне відкладання солей (накипу) на поверхні ТЕНів, що може призвести до їх перегорання, а також до збільшення тривалості обробки рослинної сировини, що використовується в харчових цілях.

Порівняння тунельних сушарок за питомими витратами теплової енергії показали, що найбільш економічними є сушарки виробництва ІТТФ (Україна), при яких енергетичні витрати становлять 3800 кДж/кг випареної вологи (рис. 5) [34].

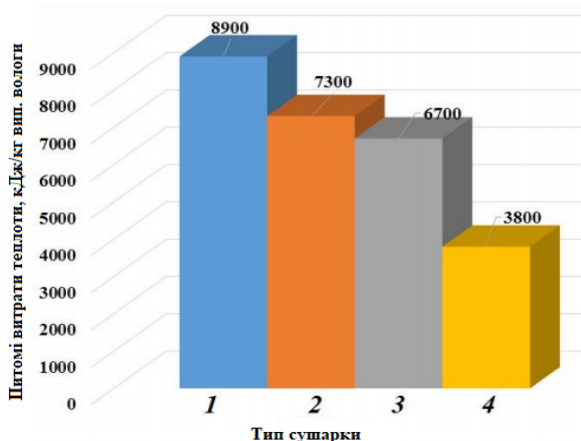


Рис. 5. Питомі витрати теплової енергії в тунельних сушарках під час сушіння овочів і фруктів: 1 – МНПП-1; 2 – Б6-КФ, РФ; 3 – Чачак, Сербія; 4 – СУМ-2, ІТТФ, Україна

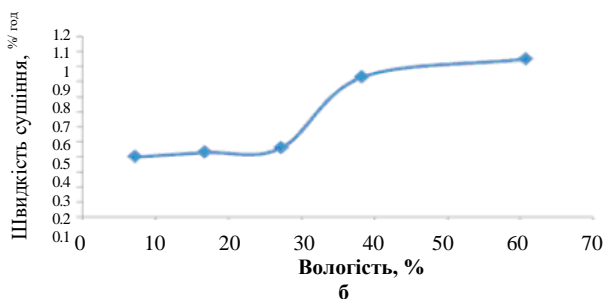
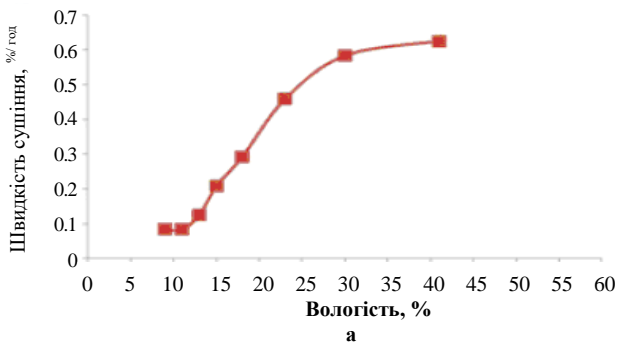
У країнах із великою кількістю сонячних днів частіше використовуються тунельні сушарки із сонячним нагріванням поверхні. На рис. 6 показана сонячна тунельна сушарка в умовах повного завантаження.

Ефективність сонячної тунельної сушарки оцінювали для сушіння часнику, чилі, гуньби та цукерок аонлі відповідно до їх наявності. На сушіння продуктів пішло 4–8 днів. Температура в тунелі завжди була вищою, ніж стартові умови.



Рис. 6. Сонячна тунельна сушарка в умовах повного завантаження під час сушіння часнику, перцю чилі, гуньби та цукерок аонлі

На рис. 7 видно, що швидкість сушіння була вищою в разі більшого вмісту вологи і зменшувалася зі зменшенням вмісту вологи. На початковій стадії сушіння вміст вологи в сушарці був великим за рахунок випаровування із зовнішньої поверхні матеріалу. У міру подальшого сушіння кількість вільної вологи, яка є на поверхні, зменшується, відбувається менше випаровування, а отже, швидкість сушіння значно зменшується із часом сушіння, також зменшується вологість повітря.



**Рис. 7. Зміна швидкості сушіння від вмісту вологи матеріалу:
а – часник; б – перець чилі**

Температура всередині сушарки була оптимальною для сушіння. Більш висока температура не є корисною для деяких харчових продуктів. Як зазначають Vega-Galvez et al. [16] та Turhan et al. [17], для сушіння доцільно використовувати температуру не вище 70 °С.

Комбіновані технології сушіння. Комбінована технологія сушіння – це поєднання двох або більше різних процесів сушіння, які можуть забезпечити синергетичний ефект, що приводить до зменшення потреби в енергії та скорочення часу сушіння зі збереженням більшості характеристик якості, зокрема смаку, поживних речовин, кольору, аромату, текстури тощо [18]. Продемонстровано, що оптимізовані комбіновані технології сушіння мають низьке питоме енергоспоживання [19]. Потрібно створити комбіновану техніку сушіння, щоб поєднати переваги різних методів сушіння та мінімізувати обмеження кожного окремого методу сушіння [20]. Відомо, що більшість методів сушіння за допомогою електромагнітного поля, таких як інфрачервоне, мікрохвильове та ультрафіолетове сушіння, покращують якість висушених продуктів із

значною економією енергоспоживання та зменшують вплив на навколишнє середовище [21, 22]. Вибір відповідної технології сушіння залежить від характеристик продукту, що сушиться. Комбіновані технології сушіння допоможуть подолати недоліки звичайного сушіння мінімізувати втрати біологічно активних речовин.

Комбіновані технології сушіння за допомогою сонячної енергії.

Сушка на сонці – традиційна техніка, яка використовує сонячну енергію шляхом прямого впливу для збереження швидкопсувних рослин у тропічних та субтропічних країнах [23]. Цей процес має багато недоліків: зіпсовані продукти через небажані кліматичні умови, погіршення поживності, втрати продуктів через шкідників, птахів та тварин. Крім того, процес трудомісткий і потребує великої площі для розташування продуктів насухо. Технологія сонячного сушіння – це екологічно чистий процес, який зберігає овочі та фрукти в чистому, гігієнічному та санітарному стані. Для цього рекомендується сушити продукти в закритих камерах та використовувати сонячну інсоляцію для нагрівання повітря в добре спроектованих сонячних колекторах. Системи сонячної енергії широко використовуються в процесах сушіння завдяки їхній нескладній технології та простоті складання. Вони можуть бути використані для прямого сонячного сушіння, коли зразок знаходиться під прямими сонячними променями опосередкованого або конвективного сонячного сушіння і змішаного режиму.

Комбіновані технології вирішують така завдання:

1. Використання комбінованих технологій сушіння підвищує енергоефективність процесу з максимальним збереженням смаку, кольору та зовнішнього вигляду.

2. Розробка інноваційних технологій на основі комбінованого сушіння рослинних матеріалів.

3. Нові технології комбінованого сушіння харчових продуктів можуть запобігти забрудненню навколишнього середовища.

Сонячно-інфрачервона сушарка. Доведено, що поєднання ІЧ-випромінювання з іншими методами сушіння має синергетичний ефект. Комбіноване інфрачервоно-ліофільне сушіння [24] застосовується для підвищення ефективності зневоднення [25]. Інфрачервоне сушіння засноване на дії ІЧ-випромінювання від джерела тепла, що підвищує його температуру та сприяє випаровуванню вологи [26]. Під час сушіння ІЧ-промені проникають у вологий зразок на певну глибину і підвищують його температуру, не нагріваючи навколишнього повітря. Хоча ІЧ-випромінювання може прискорити сушіння, чутливі до нагрівання матеріали, зокрема

сільськогосподарські матеріали, можуть бути пошкоджені разом із погіршенням їх якості, якщо інтенсивність випромінювання неправильно застосовувати [27].

Експериментальна сонячно-інфрачервона установка складається із трьох секцій, сонячного колектора, сушильної шафи, регулятора температури виробу, димоходу, джерела ІЧ-випромінювання, контролера потужності ІЧ-випромінювання та фотовольтажної панелі. Принципова схема цієї сушарки показана на рис. 8 [28].

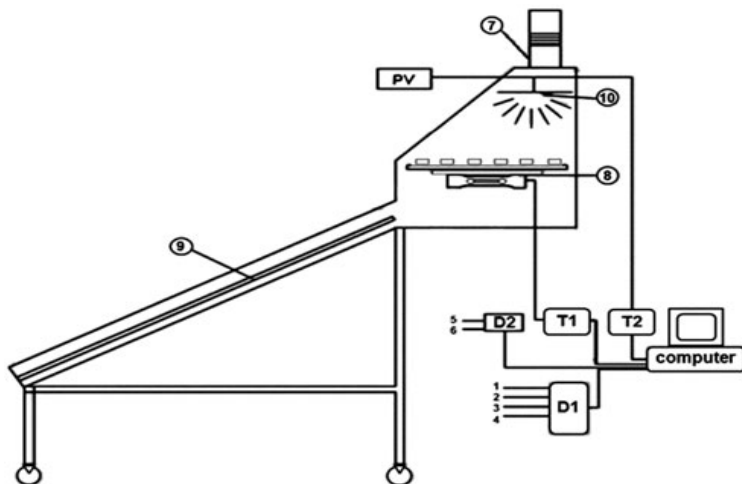


Рис. 8. Схема сонячно-інфрачервоної сушарки [28]: 1–4 – датчики температури; 5, 6 – датчики вологості та температури; 7 – димохід; 8 – тензодатчик; 9 – алюмінієва абсорбуюча пластина; 10 – інфрачервоне джерело; PV – фотоелектрична панель; D1 – реєстратор даних температури; D2 – реєстратор даних температури та вологості; T1 – тензодатчик; T2 – ватметр

Споживання електричної енергії допоміжної сушарки за допомогою фотоелектричної системи було зменшене мінімум на 40% і максимум на 69%. У статті Ziaforoughi та ін. [28] наведено дані споживання мінімальної та максимальної електричної енергії під час сушіння скибочок картоплі, що становили від 6440 кДж/кг до 15660 кДж/кг випареної вологи. Сушіння скибочок картоплі проводилося за температури теплоносія 50, 60 та 70 °C [28].

Сонячно-інфрачервона сушарка з рекуператором теплоти. Інфрачервона сушарка з рекуперацією сонячного тепла (SHRAIRD) складається з трьох блоків: сушильна камера, сонячний повітряний колектор (SAC) та блок рекуперації тепла (рис. 9) [29].

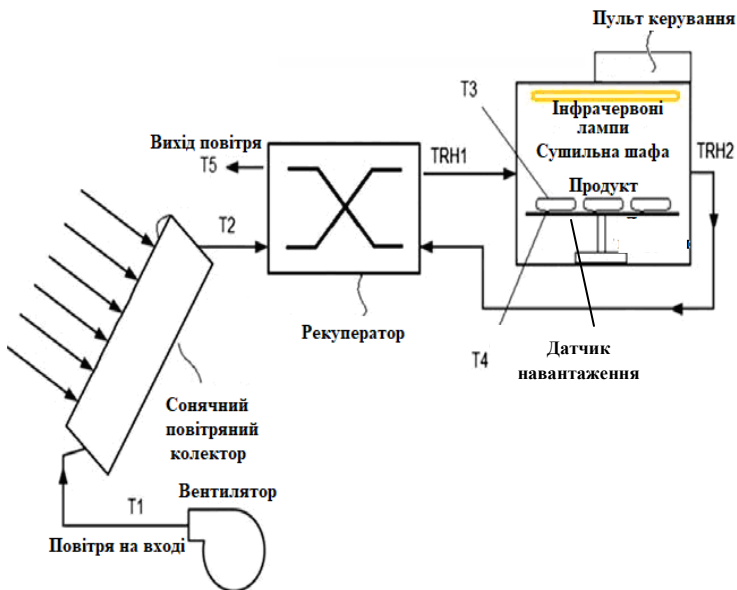


Рис. 9. Інфрачервона сушарка з підтримкою сонячної рекуперації (SHRAIRD) [29]

Споживання енергії можна зменшити, поєднавши сонячний колектор з блоком рекуперації тепла в інфрачервоній сушарці. Скибочки дині сушили від 9 г води / г сухої речовини до 0,044 г води / г сухої речовини вмісту вологи. Сонячний колектор та блок рекуперації тепла значною мірлю зменшили споживання енергії без будь-яких небажаних наслідків для якості продукту. Спочатку повітря нагрівали в сонячному повітряному колекторі, потім його температуру підвищували, проганяючи через блок рекуперації тепла в сушильну камеру. У сушильній камері шість стержневих типів біля інфрачервоних ламп були встановлені в три ряди, кожен з яких випромінює.

Сонячно-інфрачервона сушарка показала хороші характеристики завдяки використанню сонячної енергії та рекуперації тепла. Експерименти проводилися за температури поверхні продукту 50...60 °С. Середні значення в сонячному повітряному колекторі отримані такі: 7450 кДж/кг при 50 °С та 11 230 кДж/кг при 60 °С. Час сушіння нарізаної дині становить 510 хв при 50 °С та 400 хв при 60 °С. Відповідно, час висихання зменшувався за більш високої температури

поверхні продукту. Унаслідок порівняння кількох умов сушіння визначено, що 50 °С є найкращим параметром із точки зору споживання енергії, а 60 °С є найкращим із точки зору часу сушіння.

Конвективна сушарка з ІЧ-випромінюванням. Конвективна сушарка з ІЧ-випромінюванням складається із сушильної камери, в якій знаходяться лотки з матеріалом, установлені нагрівальні лампи з ІЧ-випромінюванням та вентилятором. Для зміни режиму сушіння передбачено перемикачі, що регулюють обертання вентилятора та інтенсивність випромінювання (рис. 10).

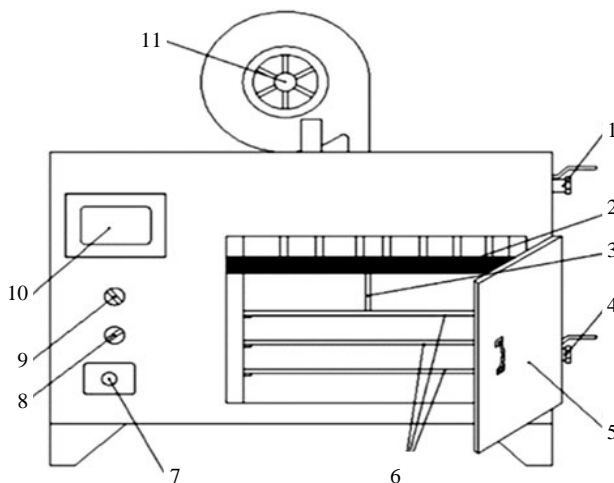


Рис. 10. Конвективна сушарка з ІЧ-випромінюванням: 1 – забір повітря; 2 – радіаційна трубка; 3 – датчик температури; 4 – вихід повітря; 5 – двері; 6 – навантажувальний матеріал; 7 – регулятор повітря; 8 – перемикач (регулятор вентилятора); 9 – перемикач (регулювальна нагрівальна трубка); 10 – екран дисплея; 11 – вентилятор [24]

Інфрачервоно-мікрохвильова сушарка. Мікрохвилі – це електромагнітні хвилі довжиною від 1 м до 1 мм; із частотами від 300 МГц до 300 ГГц відповідно [30; 31]. Найбільша загальна частота мікрохвильовок, що використовуються, становить 915 МГц для промислового застосування та 2450 МГц для комерційного, побутового і промислового використання в більшості країн [32].

Сушіння в мікрохвильовій сушарці має багато переваг над звичайними методами сушіння, такими як велика швидкість зневоднення [33], можливість отримання точного конденсату [34]. Оптимальними умовами були: потужність генератору 0,30 Вт/г,

температура повітря 89,9 °С та швидкість повітряного потоку 0,50 м/с; питоме споживання енергії становило 0,02 МДж/кг, вміст аскорбінової кислоти 25,08 мг/100 г та тривалість сушіння 10,3 хв (рис. 11).

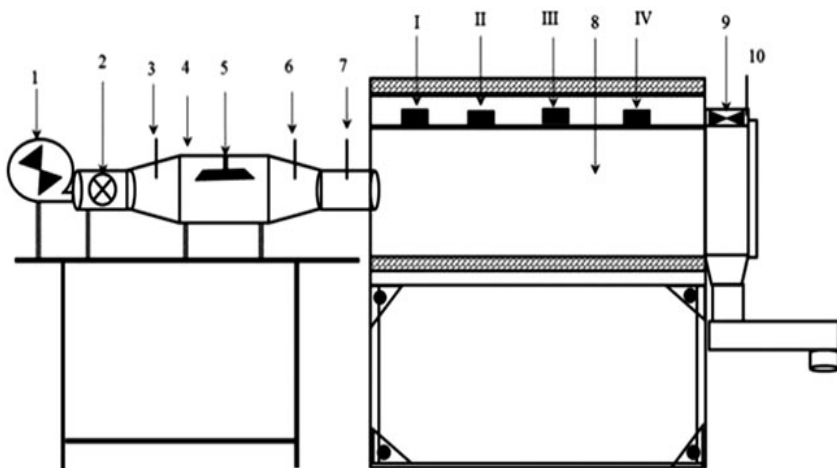


Рис. 11. Принципова схема комбінованої інфрачервоно-мікрохвильової сушарки для гарячого повітря: 1 – вентилятор; 2 – клапан регулювання повітряного потоку; 3 – датчик температури вхідного повітря (термопара типу К); 4 – камера повітряного нагрівання; 5 – ІЧ-лампа (ІЧ-лампа FSC, 1000 Вт, 230 В) для нагрівання повітря; 6 – датчик температури на виході (термопара типу К); 7 – анемометр для вимірювання швидкості руху повітря; 8 – сушильна камера; 9 – витяжний вентилятор. 10 – датчик температури повітря та вологості на виході; I, II, III та IV – магнетрони (по 1 кВт кожен) [35]

ІЧ-сушіння гарячим повітрям зменшує питоме споживання енергії порівняно зі звичайним сушінням, зберігаючи якість продукту. Завершали сушіння скибочок лимона, висушених гарячим повітрям, методом мікрохвильового сушіння гарячим повітрям.

Антал та ін. [36] дослідили три способи сушіння: сублімаційне сушіння з температурою в камері $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, сушіння середньоінфрачервоним заморожуванням та ІЧ-режим для сушіння кубиків груші за чотирьох різних температур (40, 50, 60 і 70 °С). Застосування суцільного інфрачервоного сублімаційного сушіння збільшило швидкість сушіння та значно зменшило питоме споживання енергії для зразків груш. Швидкість зневоднення кубиків груші була вищою, ніж для сублімаційного сушіння, і нижчою, ніж за ІЧ-режиму.

Загальний час висихання, необхідний для середньоінфрачервоного заморожування, становив 720–1080 хв, що на 43–14% менше порівняно з сублимаційним суцільним (1260 хв).

Конвективно-мікрохвильова сушарка. Тунельно-конвеєрна мікрохвильова сушарка серії НІМАХ (Китай) – це багатотрубний тунельний мікрохвильовий сушильний агрегат, що складається з мікрохвильового нагрівача, мікрохвильового генератора, мікрохвильового пригнічувача, механічного транспортувального механізму, системи витяжки та осушення, системи автоматичного керування. Апарат має модульну конструкцію, його легко чистити, він зручний в управлінні (рис. 12) [37].

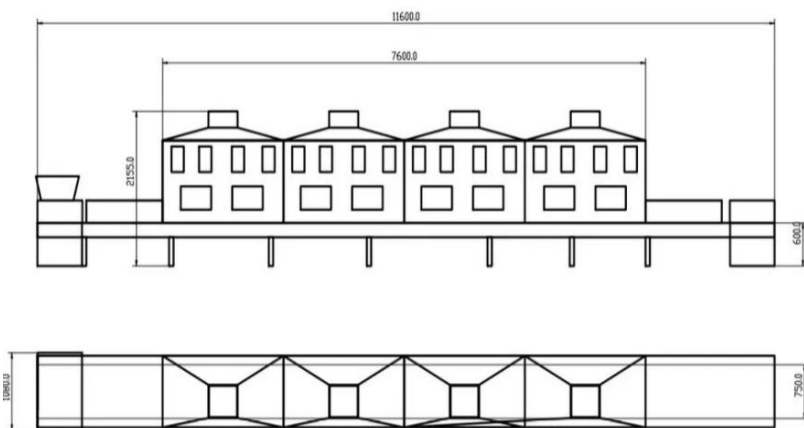


Рис. 12. Тунельно-конвеєрна конвективно-мікрохвильова сушарка

Переваги тунельно-конвеєрної конвективно-мікрохвильової сушарки:

1. Висока ефективність порівняно з традиційними способами, можна заощадити до 30% енергії.
2. Матеріал легко поглинає мікрохвильове тепло, тому немає інших втрат тепла, крім невеликої кількості втрат під час передачі. Таким чином, більший тепловий ККД і економія енергії.

Багатофункціональна сушарка. На рис. 13 подано схему багатофункціональної сушарки. Експериментальні результати показали, що сублимаційне, атмосферне сублимаційне та мікрохвильове сублимаційне сушіння давали кращу якість висушених продуктів, ніж тепловий насос. Споживання енергії під час сублимаційного сушіння було найбільшим.

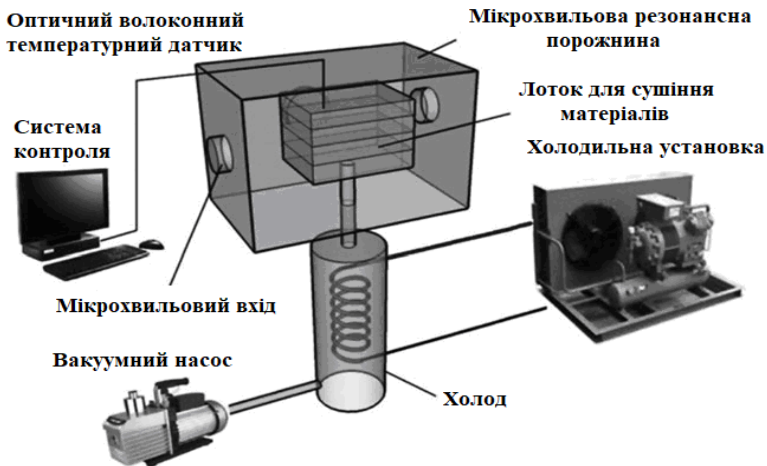


Рис. 13. Принципова схема багатофункціональної сушарки [38]

Атмосферне сублимаційне сушіння споживає енергію, подібну до теплового насоса. Але атмосферне сублимаційне сушіння характеризується довшим часом висихання продукту – близько 32 год, вищими енергетичними витратами, ніж сушіння при тепловому насосі. Завдяки застосуванню мікрохвильового джерела нагрівання зменшилися споживання енергії (32,31%) і час сушіння (8 год) порівняно з сублимаційним сушінням. Тому мікрохвильове сублимаційне та атмосферне сублимаційне сушіння мають потенціал, щоб замінити сублимаційне сушіння, з метою отримання високоякісних сушених продуктів та зниження їх собівартості. Цзян та ін. [39] порівняли споживання енергії для приготування бананових чипсів методом сублимаційного сушіння та мікрохвильового сублимаційного сушіння. порівняно зі звичайним вакуумним сублимаційним процесом, мікрохвильове сублимаційне сушіння може заощадити до 35% електричної енергії за рахунок скорочення часу сушіння до 40%. Результати дослідження показали, що вироби після сублимаційного сушіння мають яскравіший колір, ніж після мікрохвильового сублимаційного сушіння, а висока потужність нагрівальної пластини та джерела мікрохвильовки може призвести до темнішого кольору продуктів. Цзян та ін. [38] вивчали ефекти сублимаційного сушіння в поєднанні з мікрохвильовим вакуумним сушінням для бамії.

Сублимаційне та мікрохвильове вакуумне сушіння порівнювали за допомогою чотирьох різних процесів: сушіння на повітрі, сублимаційне, мікрохвильове вакуумне та комбіноване сушіння на повітрі з мікрохвильовим сушінням. Порівняно з сублимаційним, сублимаційне мікрохвильове вакуумне сушіння має менший час сушіння на 75% та споживання енергії на 72% відповідно. Другий за тривалістю час сушіння та найменша швидкість сушіння спостерігалися в разі сублимаційного та мікрохвильового сушіння. Однак сублимаційне та мікрохвильове сушіння потребує менше енергії, ніж сублимаційне. Унаслідок сушіння мікрохвильового вакуумного та на повітрі та мікрохвильового різко скоротився час обробки (97% та 79%) та було спожито значно менше енергії (79% та 50%) порівняно з сублимаційним. Мікрохвильове вакуумне сушіння мало коротший час сушіння та менші витрати енергії порівняно з сушінням на повітрі та мікрохвильовим сушінням.

Основним недоліком багатофункціональної сушарки є висока вартість установки при малій продуктивності.

Висновки. 1. Наведена класифікація тунельних сушарок на сучасному розвитку, що вказує на необхідність їх вдосконалення.

2. Найбільш економічними тунельними сушарками є тунельні сушарки з паровими теплогенераторами.

3. З аналізу літературного огляду видно, що не дивлячись на різні комбінації методів сушіння досить високе споживання теплової енергії на рівні 6440–15660 кДж/кг випареної вологи.

4. Найбільш доцільне проектування багатофункціональної сушарки з різними комбінаціями комбінованого сушіння, яка може стати прототипом при проектуванні комбінованих методи сушіння для тунельних сушарок, що є більш енергоефективними, з максимальним збереженням природних властивостей сировини.

Список джерел інформації / Referens

1. Cáceres-Huambo, B.N., Menegalli, F.C. (2009), “Simulation and Optimization of Semicontinuous Industrial Tunnel Dryers for Fruits”, *Drying Technology*, No. 27, pp. 428-436.

2. Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. (2002), “Modelling, simulation and design of drying processes”, *Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS' 2002)*, Beijing, China, Vol. A, p. 38.

3. Chou, S.K., Hawlader, M.N.A, Chua, K.J. (1997), “On the drying of food product in a tunnel dryer”, *Drying Technology Journal*, No. 15, pp. 857-880.

4. Ajala, A.S., Ngoddy, P.O., Olajide, J.O. (2012), “Statistical modeling and simulation of drying cassava chips in tunnel dryer”, *Intl. Journal of Emerging Trend in Engineering and Development*, Issue 2, Vol. 7, pp. 585-586.

5. Nindo, C.I., Sun, T., Wang, S.W., Tang, J., Powers, J.R. (2003), "Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.)", *Lebensm. Wiss u. Technol*, No. 36, pp. 507-516.
6. Abonyi, B.I., Tang, J., Edwards, C.G. (1999), "Evaluation of energy efficiency and quality retention for the Refractance Window™ drying system", *Research Report*, Washington State University, Pullman WA, pp. 34-36.
7. Heldman, D., Hartel, R. (1997), *Principles of Food Processing*. International Thomson Publishing, New York, p. 6.
8. Ajala, A.S, Babarinde, G.O., Olatunde, S.J. (2012), "Effect of temperatures, air velocity and flow rate on quality attributes of dried cassava chips", *Asian Economic and Social Society*, Vol. 2, No. 4, pp. 530-532.
9. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., Tabil, L. G. (2007), "Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts", *Journal of Food Engineering*, No. 78(1), pp. 98-108.
10. Bulent, K., Murat, T., Ibrahim, H., Hassan, V. (2007), "Solar drying of red peppers: Effect of air velocity and product size", *Journal of Applied Sciences*, No. 7(11), pp. 1490-1496.
11. Marquez, C. A., De Michelis, A., Giner, S. A. (2006), "Drying Kinetics of Rose Hip Fruits (*Rosa Eglanteria* L.)", *Journal of Food Engineering*, No. 77(3), pp. 566-574.
12. Nurul-Asyikin, M.Z., Liza, M.S, Ida-Idayu, M., Fadzilah-Adibah, A.M. (2005), "Effect of drying parameters and geometry cut on papaya quality", *Proc. KUSTEM 4th Annual Seminar 2005*. Primula Beach Resort, Kuala Terengganu, pp. 1-4.
13. Singh Paul R., Heldman Dennis R. (1993), *Introduction of Food Engineering*, 2nd Ed., Academic Press, Inc. Chapter 12, p. 415.
14. Ajala, A.S. Ajala, F.A., Tunde-Akitunde, T.Y. (2012), "Study on drying kinetics of fermented corn grains", *Food Science and Quality Management*, Vol. 5, p. 12.
15. Снежкін Ю. Ф. Енергоєфективні теплотехнології виробництва функціональних харчових порошків / Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О., Пазюк В. М. – Вінниця : РВВ ВНАУ, 2016. – 458 с.
- Snezhkin, Yu.F., Petrova, Zh.O., Paziuk, V.M. (2016), "Energy efficient heat technology and production of functional food powders" ["Enerhoefektyvni teplotekhnolohiyi vyrobnytstva funktsionalnykh kharchovykh poroshkiv"], *RVV VNAU, Vinnytsia*, 458 p.
16. 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*, No. 85, pp. 42-50.
17. Turhan, Mahir, K. Nazan Turhan, Ferhunde Sahbaz. (1997), "Drying kinetics of red pepper", *Journal of food processing and preservation*, No. 21.3, pp. 209-223.
18. Raso, J., Barbosa-Canovas, G.V. (2003), "Nonthermal Preservation of Foods Using Combined Processing Techniques", *Crit. Rev. Food Sci. Nutrit*, No. 43, pp. 265-285.

19. El-Mesery, H.S., Mao, H. (2017), "Investigation of Infrared. Assisted Dryer Effect on Energy Consumption. During Drying of Tomato", *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, No. 4, pp. 68-72.
20. Huang, L.L., Zhang, M., Wang, L.P., Mujumdar, A.S., Sun, D.F. (2012), "Influence of Combination Drying Methods on Composition, Texture, Aroma and Microstructure of Apple Slices", *LWT – Food Sci. Technol.*, No. 47, pp. 183-188.
21. Maskan, M. (2000), "Microwave/Air and Microwave Finish Drying of Banana", *J. Food Eng.*, No. 44, pp. 71-78.
22. Kose, B., Erenturk, S. (2010), "Drying Characteristics of Mistletoe (*Viscum Album L.*) in Convective and UV Combined Convective Type Dryers", *Ind. Crops Prod.*, No. 32, pp. 394-399.
23. Diamante, L.M., Munro, P.A. (1993), "Mathematical-Modeling of the Thin-Layer Solar Drying of Sweet-Potato Slices", *Sol. Energy*, No. 51, pp. 271-276.
24. Wang, H.C., Zhang, M., Adhikari, B. (2015), "Drying of Shiitake Mushroom by Combining Freeze-Drying and Mid-Infrared Radiation", *Food Bioprod. Process.*, No. 94, pp. 507-517.
25. Pan, Z.L., Shih, C., McHugh, T.H., Hirschberg, E. (2008), "Study of Banana Dehydration Using Sequential. Infrared Radiation Heating and Freeze-Drying", *LWT – Food Sci. Technol.*, No. 41, pp. 1944-1951.
26. Celma, A.R., Rojas, S., Lopez-Rodriguez, F. (2008), Mathematical Modelling of Thin-Layer Infrared Drying of Wet Olive Husk", *Chem. Eng. Process.*, No. 47, pp. 1810-1818.
27. Nimmol, C. (2010), "Vacuum Far-infrared Drying of Foods and Agricultural Materials", *J. KMUTNB*, No. 20(1), pp. 37-44.
28. Ziafroughi, A., Esfahani, J.A. (2016), "A Salient Reduction of Energy Consumption and Drying Time in a Novel PV-Solar Collector-Assisted Intermittent Infrared Dryer", *Sol. Energy*, No. 136, pp. 428-436.
29. Aktas, M., Sevik, S., Amini, A., Khanlari, A. (2016), "Analysis of Drying of Melon in a Solar-Heat Recovery Assisted Infrared Dryer", *Sol. Energy*, No. 137, pp. 500-515.
30. Dm, P. (2005), *Microwave Engineering*, Wiley, Hoboken.
31. S, R., B, G. (2010), *Microwave and RF Engineering*, Wiley, New York.
32. Vadivambal, R., Jayas, D.S. (2010), "Non-Uniform Temperature Distribution during Microwave Heating of Food Materials – a Review", *Food Bioprocess Technol.*, No. 3, pp. 161-171.
33. Wray, D., Ramaswamy, H.S. (2015), "Novel Concepts in Microwave Drying of Foods", *Dry. Technol.*, No. 33, pp. 769-783.
34. Wang, J., Xiong, Y.S., Yu, Y. (2004), "Microwave Drying Characteristics of Potato and the Effect of Different Microwave Powers on the Dried Quality of Potato", *Eur. Food Res. Technol.*, No. 219, pp. 500-506.
35. Deepika, S., Sutar, P.P. (2018), "Combining Osmotic–Steam Blanching with Infrared-Microwave–Hot Air Drying: Production of Dried Lemon (*Citrus Limon L.*) Slices and Enzyme Inactivation", *Dry. Technol.*, No. 36(14), pp. 1719-1737.
36. Antal, T., Tarektilistyak, J., Cziaky, Z., Sinka, L. (2017), "Comparison of Drying and Quality Characteristics of Pear (*Pyrus Communis L.*) Using Mid-Infrared-Freeze Drying and Single Stage of Freeze Drying", *Int. J. Food Eng.*, No. 13.

37. https://ru.made-in-china.com/tag_search_product/Microwave-Dryer_urunren_1.html

38. Jiang, H., Zhang, M., Liu, Y., Mujumdar, A. S., Liu, H. (2013), "The Energy Consumption and Color Analysis of Freeze/Microwave Freeze Banana Chips", *Food Bioprod. Process*, No. 91, pp. 464-472.

39. Jiang, N., Zhang, Z., Li, D., Liu, C., Zhang, M., Liu, C., Wang, D., Niu, L. (2017), "Evaluation of Freeze Drying Combined with Microwave Vacuum Drying for Functional Okra Snacks: Antioxidant Properties, Sensory Quality, and Energy Consumption", *LWT – Food Sci. Technol*, No. 82, pp. 216-226.

Петрова Жанна Олександрівна, д-р техн. наук, гол. наук. співроб., відділ тепломасопереносу в теплотехнологіях, Інститут технічної теплофізики НАН України. Адреса: вул. Булаховського, 2, м. Київ, Україна, 03164. Тел.: (044)424-96-38; e-mail: bergelzhanna@ukr.net.

Petrova Zhanna, Doctor of Technical Sciences, chief researcher of the Institute of technical thermal physics NAS of Ukraine, Institute of technical thermal physics NAS of Ukraine. Address: Bulakhovskogo str., 2, Kyiv, Ukraine, 03164. Tel. (044)424-96-38; e-mail: bergelzhanna@ukr.net.

Пазюк Вадим Михайлович, д-р техн. наук, пров. наук. співроб., відділ тепломасопереносу в теплотехнологіях, Інститут технічної теплофізики НАН України. Адреса: вул. Булаховського, 2, м. Київ, Україна, 03164. Тел.: (044)424-96-38; e-mail: vadim_pazuk@ukr.net.

Paziuk Vadym, Doctor of Technical Sciences, Leading Research Fellow of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Address: Bulakhovskogo str., 2, Kyiv, 03164, Ukraine; e-mail: vadim_pazuk@ukr.net.

Вішневський Віталій Миколайович, асп., мол. наук. співроб., відділ тепломасопереносу в теплотехнологіях, Інститут технічної теплофізики НАН України. Адреса: вул. Булаховського, 2, м. Київ, Україна, 03164. Тел.: (044)424-96-38; e-mail: vit.vishnevsky@i.ua.

Vyshnievskiy Vitalii, postgraduate student, junior researcher of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Address: Bulakhovsky str., 2, Kyiv, Ukraine, 03164; e-mail: vit.vishnevsky@i.ua.

Граков Дмитро Павлович, асп., пров. інженер, відділ тепломасопереносу в теплотехнологіях, Інститут технічної теплофізики НАН України. Адреса: вул. Булаховського, 2, м. Київ, Україна, 03164. Тел.: (044)424-96-38; e-mail: Grakov@nas.gov.ua.

Grakov Dmytro, graduate student, leading engineer of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Address: Bulakhovsky str., 2, Kyiv, Ukraine, 03164. Tel.: (044)424-96-38; e-mail: Grakov@nas.gov.ua.

DOI: 10.5281/zenodo.5036102