МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТРІЧКОВИХ СУШАРОК З КОМБІНОВАНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯМ ДЛЯ СУШІННЯ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ, СОНЯШНИКУ ТА СОЇ

Маренченко О.І., PhD, Зиков О.В., д.т.н.

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

На основі детального аналізу літературних джерел з досліджуваного використання інфрачервоного та мікрохвильового підведення енергії в процесі сушіння сировини зроблено висновок про перспективність розробки обладнання, що реалізує комбінований вплив інфрачервоного та мікрохвильового випромінювання для сушіння оліє місткої сировини, зокрема кукурудзи, соняшнику та сої. Попередні дослідження кінетики сушіння кукурудзи, соняшнику та сої дозволили отримати рівняння для визначення часу сушіння цих продуктів в таких сушарках, що, в свою чергу, стало відправною точкою для створення методик проектного та перевірного розрахунків таких сушарок. Аналіз цих досліджень дозволяє зробити висновок, що використання мікрохвильового випромінювання прискорює перенесення вологи з середини матеріалу назовні, а інфрачервоне випромінювання ефективно передає енергію вологи на поверхню матеріалу. Таким чином, поєднання послідовного впливу мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання може значно прискорити процес сушіння та покращити його енергоефективність. Мета конструктивного розрахунку сушарки - визначити габаритні розміри сушарки та потужність встановлених випромінювачів. На першому етапі розрахунку такі властивості продукту, як рівноважна вологість продукту та коефіцієнт активності води, визначаються параметрами продукту та навколишнього середовища. Далі визначаються парціальний тиск водяної пари в атмосферному повітрі та теплофізичні властивості водяної пари, такі як тиск насиченої водяної пари, питома теплота випаровування та коефіцієнт дифузії водяної пари у повітрі. На наступному етапі ми визначаємо швидкість руху конвеєра. Далі визначаємо відповідні значення коефіцієнтів масообміну та узагальненого коефіцієнта масообміну. Величина узагальненого коефіцієнта масопереносу визначає швидкість висихання в перший період та час висихання. Тривалість установки та кількість модулів масообміну визначаються визначеним значенням часу перебування продукту в установці. На останньому етапі розраховується потужність ІЧ-випромінювачів окремого ІЧ-модуля та потужність НВЧ-випромінювачів одного мікрохвильового модуля.

Ключові слова: сушіння, мікрохвильове випромінювання, інфрачервоне випромінювання, сушарка, зерносушіння, енергоефективність, швидкість сушіння.

Вступ. Специфікою заготовчої системи агропромислової сфери є необхідність переробки в короткий термін великої кількості продукту для забезпечення можливості його подальшого безпечного зберігання і транспортування. Найбільш розповсюдженим способом післязбиральної термообробки є сушіння. В більшості випадків сушіння є визначним фактором при забезпеченні збереження зернового продукту. Також сушіння є досить енергоємним процесом і підвищенню енергетичної ефективності на теперішній час сушарок приділяється багато уваги в Україні та світі. Крім того в Україні, також, існує проблема пов'язана з можливістю забруднення продукту, що висушується продуктами згоряння, у випадку, коли для зменшення енергетичних витрат на процес сушіння, продукт висушується за допомогою суміші топкових газів з повітрям. Тому задача розробки сушильної техніки, що забезпечує зниження енергоємності процесу при забезпеченні екологічної безпеки продукту є доцільною і актуальною задачею.

Процеси сушіння і обладнання для їх реалізації безперервно удосконалюються. В останні часи в Україні і світі спостерігається тенденція до розробки сушарок, що задля зменшення теплових викидів передають енергію безпосередньо до продукту. Це як сушарки з змішаним теплопідведенням, так і сушарки, що використовують різні види електромагнітного випромінювання. На кафедрі ПОЕМ ОНАХТ багато досліджень присвячено підвищенню економічної ефективності та екологічної безпеки процесу сушіння, створюється нове енергоефективне обладнання для сушіння, що використовує у якості джерела теплоти інфрачервоне або надвисокочастотне електромагнітне випромінювання. Результати попередніх досліджень свідчать про наявність потенціалу для розвитку з комбінованим підведенням теплоти, але таке удосконалення потребує дослідження кінетики процесу сушіння продукту в таких сушарках з метою розробки методик визначення конструктивних та режимних параметрів обладнання, що створюється.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інфрачервоне сушіння - це метод зневоднення, який має високу енергоефективність у порівнянні з конвекційними та іншими методами сушіння. [1]. За умов застосування ІЧ-випромінювання значно скорочується тривалість термічної обробки, що обумовлено відсутністю термічного опору пограничного шару продукту променистому потоку, енергія якого безпосередньо поглинається поверхнею частинок сировини. Оскільки відбувається швидке і рівномірне нагрівання і через те, що

ІЧ-випромінювання проникає безпосередньо у внутрішній шар матеріалу, не нагріваючи навколишнє повітря, витрата енергії при інфрачервоному сушінні нижча порівняно з іншими методами. [2 – 4]. Так як передача ІЧ-енергії від джерела нагрівання до поверхні матеріалу здійснюється без нагрівання навколишнього повітря, то кількість тепла, яке доставляється до матеріалу містить майже всі тепло, яке надходить від джерела випромінювання, що призводить до зменшення часу сушіння. [5] Також, інфрачервоні випромінювачі мають низьку теплову інерцію [4]. Час вимикання інфрачервоних ламп також може легко регулюватися відповідним регулюванням температури, що може скоротити час сушіння. [6]. Використання в якості джерел енергії інфрачервоних випромінювачів забезпечує високий ступінь керування процесом сушіння, як просторовий (керування розподіленням потоків енергії всередині об'єму), так і тимчасовий (динамічне керування енергетичним навантаженням в процесі сушіння). Низькі температури в робочих об'ємах дозволяють суттєво спростити конструктивні рішення ІЧ сушильних пристроїв, так як вони не потребують герметизації об'єму та його теплоізоляції.

В останні роки росте цікавість до технологій зневоднення в електромагнітному полі. Одним із способів такої технології є сушка в мікрохвильовому полі. У мікрохвильовій системі передача маси відбувається насамперед завдяки загальному градієнту тиску, встановленому через швидке утворення пари всередині матеріалу (Schiffmann) [7]. Більшість вологи видаляється з матеріалу у вигляді пари. Але, якщо матеріал спочатку дуже сирий і тиск всередині його підвищується дуже швидко, рідина може бути видалена з зразка під впливом загального градієнта тиску. Чим вище початкова вологість, тим більший вплив градієнта тиску на швидкість перенесення вологи в матеріалі. Таким чином, існує своєрідна дія «перекачування», витіснення рідини на поверхню, часто у вигляді пари [8 – 10]. Це призводить до дуже швидкого висихання без необхідності перегріву матеріалу і сушильного агента, що, можливо, спричиняє загалку або інші явища перегріву поверхні. Тривалість процесу сушіння з підводом мікрохвильової енергії на 40...90 % менше тривалості сушіння традиційними способами [11 – 13].

Мікрохвильове сушіння з як кінцева стадія конвективного сушіння скорочує час сушіння та збільшує теплову ефективність. Малежик [14] експериментально дослідив сушіння морквяних вичавок у полі-НВЧ і з'ясував, що тривалість сушіння безпосередньо залежить від величини теплового потоку і складає 23 хв. при величині теплового потоку 100 Вт/см², 19 хв. – при 200 Вт/см² і 14 хв. – при 300 Вт/см², при величині теплового потоку 450 Вт/см² – 8 хв., при 600 Вт/см² – 5 хв. та при 700-800 Вт/см² – 4 хв.

Сушарки з псевдозрідженим шаром є найбільш ефективним обладнанням і підходять для різноманітних застосувань для сушіння. Однак головним недоліком сушарок з псевдозрідженим шаром є довгий час сушіння протягом другого періоду та низька енергоефективність (Chen et al., 2001) [15]. Використання мікрохвильового нагріву забезпечує ефективний засіб подолання цього обмеження. Експериментальні дані проф. Бурдо по сушці нуту запропонованим способом підтвердили позитивний ефект [16]. Псевдозрідження здійснювалося повітрям температури навколишнього середовища. Перспективний крок в еволюції сушильних установок пов'язаний із завданням організації часткового механічного зневоднення, що можливо при комбінації бародифузійних технологій і принципів фільтраційної сушки. В роботі Бурдо [17] сформульовано вимоги до установки для зневоднення рослинної сировини при комбінованому імпульсному впливі мікрохвильовим полем і фільтрацією шару. Досліди узгодження потужності мікрохвильового поля з кількістю продукту в камері були проведені під керівництвом Погожих [18]. Але результати отримані для нагрівання води в циліндричних ємностях мають часний характер і не можуть бути розповсюджені для широкого кола задач, що виникають при сушінні матеріалів. Виходячи з наведеного вище, очікується що комбінація ІЧ та НВЧ випромінювання може стати ефективною в процесі сушіння таких культур як соняшник, соя та кукурудза.

Поєднання інфрачервоного, мікрохвильового та конвективного сушіння було розроблено Ragab та іншими [19] з метою вивчення часу висушування та якості буряка. Вони заявляли, що застосування мікрохвильової енергії має бути на першій стадії сушіння, коли зразок має значну вологість, оскільки він має здатність нагрівати весь об'єм зразка, оскільки ІЧ нагріває поверхню та прискорює випаровування вологи на поверхні. Про застосування продуктів комбінованого мікрохвильового, інфрачервоного та гарячого повітря для харчових продуктів також обговорювали Датта та Ні [20]. Поєднання мікрохвильового та інфрачервоного нагрівання було вивчено Вангом і Шенгом [21] для сушіння шматочків персика. Вони констатували свої спостереження у чотирьох результатах: (1) споживання енергії зменшилось, а швидкість зневоднення зросла зі збільшенням мікрохвильової та інфрачервоної потужності; (2) як для інфрачервоного, так і для мікрохвильового висушування було два падіння швидкості; (3) вплив взаємодії інфрачервоної енергії та вологообміну впливають як на споживання енергії, так і на якість; і (4) якість та енергоспоживання лінійно зменшувалися зі збільшенням вологообміну та мікрохвильової потужності відповідно. Інші дослідники також використовували мікрохвильову сушку з інфрачервоним нагріванням для визначення умов сушіння в ІЧ та мікрохвильовій сушарці для виробництва сухарів [22]. Вони використовували звичайну мікрохвильову, інфрачервону та інфрачервону-мікрохвильову сушарки окремо та в поєднанні для висушування тіста з сухарями приблизно від 40,9 до 8 % вмісту вологи. Загальну різницю кольорів та вплив потужності на зміну кольору вивчали за будь-яких умов; значення загальної різниці кольорів були вищими при інфрачервоному сушінні та нижчі при мікрохвильовій сушці, хоча не спостерігалось впливу потужності на зміну кольору. Roknul та ін. [23]

представили експериментальні результати та аналіз чотирьох методів сушіння, а саме. конвективне сушіння, конвективне сушіння на НВЧ-сушарці, інфрачервоне сушіння та конвективне сушіння з НВЧ-підігрівом, за кольором, мікроструктурою, щільністю, здатністю до регідратації та текстурою після регідратації шматочків салатного салату (*Lactuca sativa* L.). Результати показали, що час сушіння, необхідний для шматочків салатного салату з використанням НВЧ, був найкоротшим (120 хв.), після чого сушили гарячим повітрям з НВЧ підігріванням (140 хв), і інфрачервоним сушінням (180 хв); конвективне сушіння вимагало найдовшого часу (360 хв.). Зокрема, НВЧ дало рівномірне висушування і якість висушених зразків з використанням НВЧ також була найкращою серед цих чотирьох методів сушіння.

Аналіз приведених досліджень дозволяє зробити висновок, що використання НВЧ випромінювання прискорює перенесення вологи з середини матеріалу назовні, а ІЧ випромінювання ефективно передає енергію до вологи на поверхні матеріалу. Таким чином комбінація послідовного впливу НВЧ та ІЧ випромінювання може істотно прискорити процес сушіння і покращити його енергоефективність. Для реалізації такої технології була запропонована стрічкова сушарка з комбінованим енергопідведенням [24 – 26], але промислове виробництво такого обладнання потребує розробки методик його проектного та перевірного розрахунків.

Метою роботи є визначення параметрів функціонування стрічкової сушарки з комбінованим мікрохвильовим та інфрачервоним підведенням енергії, що забезпечують раціональні режими сушіння соняшника, кукурудзи та сої та розробка методик розрахунку таких сушарок.

При розрахунках нового типорозміру стрічкової сушарки на основі отриманої інформації на стадії науково-випробувальних і дослідно-технологічних робіт, формуються вихідні данні, в які входить продуктивність і тип стрічкової сушарки, властивості висушуваної сировини як об'єкту сушіння (вологість, температура сировини, теплофізичні характеристики) і вимоги до якості готової продукції (вологість, морфологічні та структурні характеристики).

Метою конструктивного розрахунку сушарки є визначення габаритних розмірів сушарки та потужність встановлених випромінювачів. Враховуючи, що ширина установки регламентована шириною встановлених масообмінних модулів, основним параметром, що визначає геометрію установки є її довжина $L_{уст}$, яка може бути визначена як:

$$L_{уст} = \omega_{стр} \cdot \tau_{суш} \quad (1)$$

де $\omega_{стр}$ – швидкість стрічки, $\tau_{суш}$ – час сушіння

Швидкість стрічки може бути визначена як:

$$\omega_{стр} = G_n / (B \cdot h \cdot \rho_n) \quad (2)$$

де G_n – продуктивність установки, B – ширина стрічки, h – висота шару сипкого матеріалу на стрічці, ρ_n – насипна густина сипкого матеріалу.

Ширина стрічки однозначно визначається в залежності від ширини масообмінних модулів. Максимальна висота шару сипкого матеріалу на стрічці регламентована умовами запобігання виходу НВЧ поля за межі установки, тобто конструкцією хвильоводів.

Час сушіння та швидкість сушіння в першому періоді визначається за методиками, що наведено в [26–29], де питома поверхня матеріалу визначається за даними [12].

Коефіцієнт масовіддачі β визначається як:

$$\beta = Sh \cdot D / L_k \quad (3)$$

де L_k – розмір камери, D – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітря.

Для комбінованого типу сушіння Коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням адитивності як:

$$\beta = \beta_{ІЧ} + \beta_{НВЧ} \quad (4)$$

де $\beta_{ІЧ}$ – Коефіцієнт масовіддачі, в умовах ІЧ випромінювання, $\beta_{НВЧ}$ – коефіцієнт масовіддачі, в умовах НВЧ випромінювання.

Для розрахунку числа Bu за методиками [26–29] в чисельнику знаходиться відповідна складова загальної потужності установки: потужність ІЧ випромінювачів для розрахунку $\beta_{ІЧ}$ та потужність НВЧ випромінювачів для розрахунку $\beta_{НВЧ}$. В знаменнику в якості питомої видаленої вологи $W_{пт}$ прийнято витрату вологи, що видаляється при одиницьковому зниженні вологовмісту продукту в першому модулі.

$$W_{пт} = G \cdot 0,01 \quad (5)$$

Алгоритм конструктивного розрахунку сушарки представлено на рис.1. Вхідними даними для розрахунку є:

- технологічні параметри – початковий і кінцевий вологовміст продукту $W_{п}$, $W_{к}$, продуктивність установки G_n , початкова температура продукту t_n ;
- вид продукту та його властивості – висота шару продукту, насипна густина продукту, питома поверхня продукту або геометричні розміри часток продукту та маса 1000 зерен;
- регламентовані параметри установки – довжина камери L_k , ширина стрічки транспортера B , задана потужність установки та співвідношення між потужністю НВЧ та ІЧ випромінювачів.
- параметри навколишнього середовища – температура повітря, відносна вологість повітря.

На першому етапі розрахунку за параметрами продукту та навколишнього середовища визначаються властивості продукту, такі як рівноважний вологовміст продукту та коефіцієнт активності води. Далі визна-

чається парціальний тиск водяної пари в навколишньому повітрі та теплофізичні властивості водяної пари, такі як тиск насиченої водяної пари, питома теплота пароутворення та коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі.

На наступному етапі визначаємо швидкість руху стрічки транспортеру за рівнянням 2. Далі визначаємо питомих видаленої вологи $W_{пт}$ за формулою 5, та число Пекле і число енергетичної дії. Використовуючи отримані значення чисел подібності в залежності від типу продукту, що висушується, та способу підведення енергії розраховується число Шервуда для кожного типу енергопідводу та відповідні значення коефіцієнтів масовіддачі. Узагальнений коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням адитивності 4. По значенню узагальненого коефіцієнта масовіддачі визначається швидкість сушіння в першому періоді, яка є максимальною швидкістю сушіння за даних умов $N_{\max}$. Знаючи швидкість сушіння в першому періоді, визначають час сушіння $\tau_{суш}$ який є часом знаходження продукту в установці.

За визначеним значенням часу знаходження продукту в установці по формулі 1 визначається довжина установки $L_{уст}$. Далі визначається кількість масообмінних модулів як:

$$n = L_{уст} / (L_k + L_{дон}) \quad (6)$$

де $L_{дон}$ – відстань між масообмінними модулями.

На останньому етапі розраховується потужність ІЧ випромінювачів окремого ІЧ модуля $N_{ІЧ}$ та потужність НВЧ випромінювачів окремого НВЧ модуля $N_{НВЧ}$ за рівнянням:

$$N_{ІЧ} = 2N_{уст} \cdot k_{ІЧ} / n \quad (7)$$

$$N_{НВЧ} = 2N_{уст} \cdot (1 - k_{ІЧ}) / n \quad (8)$$

де $k_{ІЧ}$ – відстань між масообмінними модулями.

Для з'ясування параметрів установки, що існує необхідно виконати перевірний розрахунок, алгоритм якого наведено на рис 2.

Рис. 1 – Алгоритм конструктивного розрахунку сушарки

Метою перевірного розрахунку сушарки є визначити чи відповідає час знаходження продукту в установці потрібному часу сушіння.

Вхідними даними для перевірного розрахунку є:

- технологічні параметри – початковий і кінцевий вологовміст продукту W_n, W_k , продуктивність установки G_n , початкова температура продукту t_n ;

- вид продукту та його властивості – висота шару продукту, насипна густина продукту, питома поверхня продукту або геометричні розміри часток продукту та маса 1000 зерен;
- регламентовані параметри установки – довжина камери L_k , ширина стрічки транспортера B , задана потужність НВЧ та ІЧ випромінювачів та кількість масообмінних модулів n .
- параметри навколишнього середовища – температура повітря, відносна вологість повітря.

На першому етапі розрахунку за параметрами продукту та навколишнього середовища визначаються властивості продукту, такі як рівноважний вологовміст продукту та коефіцієнт активності води. Далі визначається парціальний тиск водяної пари в навколишньому повітрі та теплофізичні властивості водяної пари, такі як тиск насиченої водяної пари, питома теплота пароутворення та коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі.

На наступному етапі визначаємо швидкість руху стрічки транспортеру за рівнянням 2 та довжину установки як:

$$L_{уст} = (L_k + L_{дон}) / n \quad (9)$$

Час знаходження продукту в установці визначаємо як:

$$\tau_{суш} = L_{уст} / \omega_{стр} \quad (10)$$

Розраховується загальна потужність ІЧ випромінювачів $N_{устІЧ}$ загальна та загальна потужність НВЧ випромінювачів $N_{устНВЧ}$ за рівнянням:

$$N_{устІЧ} = N_{ІЧ} \cdot n / 2 \quad (11)$$

$$N_{устНВЧ} = N_{НВЧ} \cdot n / 2 \quad (12)$$

Далі визначаємо питомих видаленої вологи $W_{пт}$ за формулою 5, та число Пекле і число енергетичної дії для кожного з видів енергопідведення.

Рис. 2 – Алгоритм перевірного розрахунку сушарки

Використовуючи отримані значення чисел подібності в залежності від типу продукту, що висушується, та способу підведення енергії розраховується число Шервуда для кожного типу енергопідводу та відповідні значення коефіцієнтів масовіддачі. Узагальнений коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням адитивності 4. По значенню узагальненого коефіцієнта масовіддачі визначається швидкість сушіння в першому періоді, яка є максимальною швидкістю сушіння за даних умов $N_{\max}$. Знаючи швидкість сушіння в першому періоді визначають час сушіння $\tau_{\text{суш}}$.

Якщо визначений час сушіння не є меншим за час знаходження продукту в установці, то збільшують потужність випромінювачів наперед задану величину і повторюють розрахунки часу сушіння для нових значень потужності.

За допомогою розроблених методик була розрахована та створена експериментальна стрічкова установка для зневоднення рослинної сировини електромагнітним полем МХ і ІЧ призначена для сушіння рослинної сировини. Особливістю стрічкової сушарки є те, що нагрів рухомого, щільного шару сировини здійснюється за рахунок нагріву вологого діелектричного матеріалу частин сировини (зерна) в середовищі мікрохвильового та інфрачервоного електромагнітного поля. Розрахункова продуктивність експериментальної установки 58 кг/год, при зниженні вологості з 25 до 14 %.

Висновки

Розроблена методика дозволяє розраховувати параметри інноваційних сушарок з комбінованим ІЧ та НВЧ енергопідведенням та може бути використана при проектуванні сушильної техніки. Наразі постає задача оптимізації режимних та конструктивних параметрів таких установок.

References

1. Togrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71(3), 311–323.
2. Hashimoto, A. & Kameoka, T. (1999). Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology*, 17(7–8), 1613–1626.
3. Swasdisevi, T.; Devahastin, S.; Sa-Adchom, P. & Soponronnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92(1), 100–106.
4. Arsoy, S. (2008). Temperature-controlled infrared drying characteristics of soils. *Drying Technology*, 26(12), 1477–1483.
5. Wang, J. & Sheng, K.C. (2004). Modeling of multi-layer far-infrared dryer. *Drying Technology*, 22(4), 809–820.
6. Chua, K.J.; Chou, S.K.; Mujumdar, A.S.; Ho, J.C.; & Hon, C.K. (2004). Radiant–convective drying of osmotic treated agro-products: Effect on drying kinetics and product quality. *Food Control*, 15(2), 145–158.
7. Burdo O. G. (2012) Novye principy obezvozhivaniya zernovogo syr'ya [New principles of dehydration of grain raw materials]. *Zernovye produkty i kombikorma*. № 1. P. 42–46 (in Russian).
8. Burdo O.G., Shit M.L., Zykov A.V., Reznichenko D.N., & Zhuravlev A.A. (2016) Tehnologii adresnoj dostavki jenerгии i termotransformacii pri proizvodstve produktov pitaniya [Technologies of targeted energy delivery and thermal transformation in food production]. *Problemele Energeticii Regionale*. 2 (31) (in Russian). Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-adresnoj-dostavki-enerгии-i-termotransformatsii-pri-proizvodstve-produktov>
9. O. G. Burdo, V. N. Bandura, Yu. O. Levtrinskaya (2017) Elektrotehnologii adresnoj dostavki energii pri obrabotke pishchevogo syr'ya [Electrical technologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials]. *EOM*. №3. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrotehnologii-adresnoj-dostavki-enerгии-pri-obrabotke-pischevogo-syrya>.
10. Burdo, O.G., Sirotuk, I.V., Al'khuri, Yu., Levtrinskaya, Yu.O. (2018) Mikrovolnovaja jenergiya, kak fa-ktor intensivacii teplomassoperenosa [Microwave energy as a factor of heat and mass transfer intensification]. *Problemele Energeticii Regionale*. 1(36) (in Russian). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrovolnovaya-energiya-kak-faktor-intensifikatsii-teplomassoperenosa>.
11. Burdo O.G. (2013). *Pishhevyje nanoenergotehnologii [Food nanoenergy technologies]*. Kherson (in Russian).
12. Burdo O.G., Zikov O.V., Gayda S. (1999). Novi printsipi termoobrobki zerna [New principles of grain heat treatment]. *Naukovi praci ODAKhT*, 31. 223–229 (in Ukrainian).
13. Burdo, O. G., Yaroviy, I. I., Ruzhitska, N. V. (2010). Doslidzhennya kinetiki sushinnya nerukhomogo sharu zerna v elektromagnitnomu poli [Investigation of the kinetics of drying a fixed grain layer in an electromagnetic field]. *Naukovi praci ODAKhT*, 38 (1). 101–105 (in Ukrainian).
14. Malezhyk, I.F., Bessarab, O.S., Bandurenko, H.M., Levkivs'ka, T.M. (2014). Doslidzhennya protsesu nvch-sushinnya morkvyanikh vichavok pri oderzhanni karotinovmisnogo zbagachuvacha [Investigation of the kinetics of drying a fixed grain layer in an electromagnetic field]. *Naukovi praci ONAKhT*. 45(2). 51–55 (in Ukrainian).
15. Chen, G., Wang, W. & Mujumdar, S. (2001). Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material. *Chemical Engineering Science*. 56. 6823–6835.

16. Burdo, O.G., Kazmiruk, Yu.A. (2008). Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti pri sushke dispersnykh produktov [Ways to increase energy efficiency when drying dispersed products]. *Problemele Energeticii Regionale*. 1. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-povysheniya-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-dispersnyh-produktov>.
17. Burdo, O.G., Terziyev, S.G., Yarovoy, I.I., Borshch, A.A. (2012) Elektromagnitnyye tekhnologii obezvozhivaniya syr'ya [Electromagnetic technologies of raw material dewatering]. *Problemele Energeticii Regionale*. 1. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektromagnitnye-tehnologii-bebezvozhivaniya-syrya>.
18. Pohozhykh, M. I., Tsurkan, M. M. (2011). Vyznachennya ratsional'noho navantazhennya doslidnoyi NVCh-kamery [Determination of the rational load of an experimental microwave camera]. *Prohresyvi tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli*, 1. 112-115. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2011_1_21.
19. Ragab, K., Zhongli, P., Adel, S., Bruce, R.H. & Sherief, M. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *Food Science and Technology*, 44(81), 1126–1132.
20. Datta, A.K., & Ni, H. (2002). Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering*, 51(4), 355–364.
21. Wang, J. & Sheng, K.C. (2006). Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT - Food Science and Technology*, 39(3), 247–255.
22. Tireki, S., Sumnu, G. & Esin, A. (2006). Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. *European Food Research and Technology*, 222(1–2), 8–14.
23. Roknul, A.S.M., Zhang, M., Mujumdar, A.S. & Wang, Y. A (2014). Comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). *Drying Technology*, 32(6), 657–666.
24. Bandura, V.M., Yarovyy, I.I., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. (2018). Aparaty dlya sushinnya roslynnoyi syrovyny elektromagnitnym polem [Devices for drying vegetable raw materials by electromagnetic field]. *Scientific Works*, 82(2). 123-129.
25. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J. & Marenchenko E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 4 (11 (88)), 34-42
26. Burdo, O. et al (2017). Using of the Wave Technologies in Intensification Processes of Heat and Mass Transfer. *EUREKA Phys. Eng.* 4. 18–24.
27. Bandura, V.M., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. (2017). Sushinnya nasinnya sonyashnyku v elektromagnitnomu poli [Drying of sunflower seeds in an electromagnetic field]. *Tekhnika, energetika, transport APK*. 3(98). 63-68.
28. Bandura, V.N., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. & Katasonov O.V. (2017). Kinetyka sushinnya oliynoyi syrovyny v elektromagnitnomu poli [Kinetics of drying oilseeds in an electromagnetic field]. *Scientific Works*, 81(1). 94-98.
29. Burdo O.G., Marenchenko, O.I., Pylypenko, Ye.O. & Balagura V.V. (2017). Matematicheskaya model' mikrovolnovoy lentochnoy sushilki [Mathematical model of a microwave belt dryer]. *Materialy VI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Innovatsiyi enerhotekhnolohiyi»*. Odesa:ONAKhT. 226-232.

METHOD OF CALCULATION OF TAPE DRYERS WITH COMBINED ELECTROMAGNETIC ENERGY SUPPLY FOR DRYING CORN, SUNFLOWER AND SOYBEAN SEEDS

Marenchenko O.I., PhD, Zykov O.V., Dr. Sci. Tech.
Odessa National Academy of Food Technologies

Based on a detailed analysis of the literature on the use of infrared and microwave energy supply in the drying of raw materials, the conclusion is made about the prospects of developing equipment that combines the combined effects of infrared and microwave radiation for drying oil-containing raw materials, including corn and soybeans. Analysis of these studies allows us to conclude that the use of microwave radiation accelerates the transfer of moisture from the middle of the material to the outside, and infrared radiation effectively transmits energy to moisture on the surface of the material. Thus, the combination of sequential exposure to microwave and infrared radiation can significantly accelerate the drying process and improve its energy efficiency. Previous studies of the drying kinetics of corn, sunflower and soybeans have yielded equations for determining the drying time of these products in such dryers, which, in turn, has become a starting point for creating methods of design and verification calculations of such dryers. The purpose of the constructive calculation of the dryer is to determine the overall dimensions of the dryer and the power of the installed emitters. At the first stage of calculation, the properties of the product, such as

the equilibrium moisture content of the product and the coefficient of water activity, are determined by the parameters of the product and the environment. Next, the partial pressure of water vapor in the ambient air and the thermophysical properties of water vapor, such as the pressure of saturated water vapor, the specific heat of vaporization and the diffusion coefficient of water vapor in the air, are determined. At the next stage we determine the speed of the conveyor belt. Next, we determine the corresponding values of the mass transfer coefficients and the generalized mass transfer coefficient. The value of the generalized mass transfer coefficient determines the drying rate in the first period and the drying time. The length of the installation and the number of mass transfer modules are determined by the determined value of the product residence time in the installation. At the last stage, the power of the IR emitters of a separate IR module and the power of the microwave emitters of a single microwave module are calculated.

Keywords: drying, microwave radiation, infrared radiation, dryer, grain drying, energy efficiency, drying speed.

Список використаної літератури

1. Togrul, H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering* 2005, 71(3), P. 311–323.
2. Hashimoto, A., Kameoka, T. Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology*. 1999, 17(7–8), P. 1613–1626.
3. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice / Swasdisevi, T. et. al.. *Journal of Food Engineering* 2009, 92(1), P. 100–106.
4. Arsoy, S. Temperature-controlled infrared drying characteristics of soils. *Drying Technology* 2008, 26(12), P. 1477–1483.
5. Wang, J.; Sheng, K.C. Modeling of multi-layer far-infrared dryer. *Drying Technology* 2004, 22(4), P. 809–820.
6. Radiant–convective drying of osmotic treated agro-products: Effect on drying kinetics and product quality / Chua, K.J. et al. *Food Control* 2004, 15(2), 145–158.
7. Бурдо О. Г. Новые принципы обезвоживания зернового сырья. *Зерновые продукты и комбикорма*. 2012. № 1. С. 42–46.
8. Технології адресної доставки енергії і термотрансформації при виробництві продуктів харчування / О.Г. Бурдо та ін. *Проблеми регіональної енергетики*. 2016. №2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-adresnoy-dostavki-energii-i-termotransformatsii-pri-proizvodstve-produktov-pitaniya> (дата звернення: 19.01.2020).
9. Бурдо О. Г., Бандура В. Н., Левтринська Ю. О. Електротехнології адресної доставки енергії при обробці харчового сировини. *ЭОМ*. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrotehnologii-adresnoy-dostavki-energii-pri-obrabotke-pischevogo-syrnya> (дата звернення: 19.01.2020).
10. Микроволнова енергія, як фактор інтенсифікації тепломасопереносу / О.Г. Бурдо та ін. *Проблеми регіональної енергетики*. 2018. №1 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrovolnovaya-energiya-kak-faktor-intensifikatsii-teplomassopere-nosa> (дата звернення: 19.01.2020).
11. Бурдо О.Г. Пищевые нанотехнологии. Херсон, 2013. 294с.
12. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Гайда С. Нові принципи термообробки зерна. *Наук. Пр. ОДАХТ*. Одеса., 1999. №31. С. 223–229.
13. Бурдо О. Г., Яровий І. І., Ружицька Н. В. Дослідження кінетики сушіння нерухомого шару зерна в електромагнітному полі. *Наукові праці ОНАХТ*, 2010, №38 (1). С. 101–105.
14. Дослідження процесу нвч-сушіння морквяних вичавок при одержанні каротиновмісного збагачувача / І. Ф. Малезик та ін. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Т. 2, № 45. С. 51–55.
15. Chen, G., Wang, W. and Mujumdar, S. Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material. *Chemical Engineering Science*. 2001. №56. P. 6823–6835.
16. Бурдо О. Г., Казмирук Ю. А. Пути повышения энергетической эффективности при сушке дисперсных продуктов. *Проблеми регіональної енергетики*. 2008. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-povysheniya-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-dispersnyh-produktov> (дата звернення: 19.01.2020).
17. Електромагнітні технології обезвоживання сировини / О.Г. Бурдо та ін. *Проблеми регіональної енергетики*. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektromagnitnye-tehnologii-obezvozhvaniya-syrnya> (дата звернення: 19.01.2020).
18. Погожих М. І., Цуркан М. М. Визначення раціонального навантаження дослідної НВЧ-камери. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2011. Вип. 1. С. 112–115. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2011_1_21.
19. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. / Ragab, K. et al. *Food Science and Technology*. 2011, 44(81), P. 1126–1132.
20. Datta, A.K.; Ni, H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering*. 2002, 51(4), P. 355–364.
21. Wang, J.; Sheng, K.C. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT. Food Science and Technology*. 2006. 39(3). P. 247–255.

22. Tireki, S., Sumnu, G.; Esin, A. Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. *European Food Research and Technology*. 2006, 222(1–2), P. 8–14.
23. A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). / Roknul, A.S.M. et al. *Drying Technology* 2014, 32(6), P. 657–666.
24. Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем / В.Н. Бандура та ін.. *Наукові праці*. 2018. Т.82, вип. 2. С. 123-129.
25. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. / O Burdo, et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4 (11 (88)), P. 34-42
26. Using of the Wave Technologies in Intensification Processes of Heat and Mass Transfer / Burdo O. et al. *EU-REKA Phys. Eng.* 2017. Т. 4, № 4. P. 18–24.
27. Бандура В.Н., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О. Сушіння насіння соняшнику в електромагнітному полі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 3(98). С. 63-68.
28. Кінетика сушіння олійної сировини в електромагнітному полі / Бандура В.Н. та ін. *Наукові праці*. 2017. Т.81, вип. 1. С. 94-98.
29. Бурдо О.Г., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О. Математическая модель микроволновой ленточной сушки. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» 4 – 8 вересня 2017 р. Одеса:ОНАХТ, 2017. С. 226-232.

Отримано в редакцію 30.03.2021
Прийнято до друку 01.07.2021

Received 30.03.2021
Approved 01.07.2021