

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ В МІКРОХВИЛЬОВИХ СТРІЧКОВИХ СУШИЛЬНИХ АПАРАТАХ

Яровий І.І., к.т.н., доцент, Алі В.П. аспірант,
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Стаття відображає завершений етап наукового дослідження. Загальним напрямом наукової роботи є впровадження технологій адресної доставки енергії у процеси сушіння, стерилізації та теплової обробки харчових продуктів і сировини.

В роботі приведено короткий аналіз актуальності наукової тематики за темою «мікрохвильове сушіння». Описано типову конструкцію сушильних установок стрічкового типу. Для більшості мікрохвильових апаратів відсутня систематизована інформація про доцільні режими обробки вологих матеріалів та типові параметри процесів вологовидалення, що ускладнює можливість їх інтеграції в існуючі технологічні процеси. Одним з факторів прискорення розвитку технологій мікрохвильового сушіння може стати накопичення та систематизація інформації про доцільні режими та обмеження процесів МХ сушіння для типової рослинної сировини.

Експериментальне моделювання процесу видалення вологи в МХ установках розглядається як доцільний шлях дослідження даного типу процесів. Пропонується дослідити типові режими для обробки рослинної сировини з наступною систематизацією отриманих залежностей.

Типові умови взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля та рухомого шару вологого матеріалу в таких установках доцільно змодельовати за допомогою спеціального стенду та відповідної методики. Основним завданням стенду є створення умов для точного і зручного моделювання впливу МХ випромінювання сушильної камери на зразок вологого матеріалу з заданими характеристиками шару. Режим обробки матеріалу в багатозонній суширці моделюється шляхом повторів проходження зразка через сушильну камеру.

Приведено опис конструкції розробленого дослідного стенду. Описано методику проведення експерименту. Описано сировину, що використовувалась для проведення дослідження. Приведено результуючі залежності отримані в ході експериментів. Приведено порівняльну оцінку отриманих результатів з попередніми дослідженнями. Визначено напрям та задачі наступного етапу дослідження.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, рослинні матеріали, комбіновані способи сушіння.

Вступ. Серед актуальних на сьогодні способів сушіння та типових конструкцій сушильних апаратів преvalюють такі, що побудовані на принципах конвективної передачі тепла. Потік тепла, що генерується джерелом енергії у вигляді агента сушіння, транспортується сушаркою до поверхні вологого матеріалу і передається волозі матеріалу а через його поверхню. Такий «транспортний коридор» для енергетичного потоку, що включає декілька перетворень, має поточні, непродуктивні втрати енергії, уникнути яких неможливо внаслідок фізичних обмежень в процесах теплопередачі.

Тож актуальною науковою проблемою залишається пошук способів та методів удосконалення процесів сушіння з використанням інших, відмінних від конвективних, способів передачі тепла від джерела енергії до вологи у внутрішніх шарах матеріалу, що обробляється. В якості однієї з альтернатив конвективному способу сушіння, все більше застосування знаходять сушильні апарати, що використовують нагрівання вологої сировини мікрохвильовим електромагнітним полем.

Спосіб сушіння, що використовує в якості джерела теплової енергії взаємодію надвисокочастотного електромагнітного поля та вологи, що міститься в структурі матеріалу, має багато реалізацій і їх кількість швидко зростає з появою нових технічних рішень. До типових способів сушіння дану технологію віднести важко, проте відомий пошуковий сервіс видає понад 10 мільйонів результатів за ключовими словами «microwave drying», що свідчить про актуальність тематики. Ресурс www.sciencedirect.com, на вересень 2022 р. індексує 14,9 тис. джерел в наукових виданнях з тими ж ключовими словами. Цей же ресурс відображає динаміку інтересів наукової спільноти до даного напрямку досліджень. Так у 2000 році кількість подібних публікацій складала менше 1,5 тис., в подальшому нелінійно зростаючи з логарифмічною залежністю і у 2021 році склала вже 15,1 тис. посилань. Тож мікрохвильовий спосіб сушіння вже набув досить широкого застосування і користується все зростаючою увагою у науковців, що дозволяє віднести його до найбільш перспективних та вартих уваги інноваційних технологій видалення вологи [1,2].

Метою роботи став пошук доцільного варіанту експериментального моделювання процесу видалення вологи з сипучих рослинних матеріалів в мікрохвильових сушильних установках стрічкового типу.

Об'єкт дослідження: процес видалення вологи з сипучих вологих матеріалів рослинного походження при комбінованому енергетичному впливі: мікрохвильовому нагріванні внутрішньої вологи матеріалу та фільтраційному видаленні поверхневої вологи.

Предмет дослідження: кінетика процесу видалення вологи з рухомого шару сипучої рослинної сировини при комбінованому способі сушіння.

Серед промислових зразків мікрохвильового (МХ) обладнання, що забезпечує безперервний процес обробки сировини лідерами є стрічкові апарати з лінійним, послідовним розміщенням сушильних камер обладнаних мікрохвильовими випромінювачами та аспіраційною системою. Зразки такого обладнання можна знайти у багатьох виробників мікрохвильових апаратів для сушіння та стерилізації сипучих матеріалів, в т.ч. штучних та упакованих продуктів. В якості прикладу можна привести декілька зразків стрічкових мікрохвильових сушарок компанії «Kerone» рис. 1.

Варіативність базової конструкції стрічкових мікрохвильових сушильних установок досить висока. Основним параметром, що визначає їх габаритні характеристики та номінальну продуктивність є цільова сировина (вологий матеріал) для обробки якої розроблялась конкретна установка. Найбільш численна категорія таких установок призначена для обробки рослинної (трав'яної, зернової та бобової) сировини, вони мають невелику висоту вхідного та вихідного шлюзів, в межах 20-50 мм, значну ширину стрічки (400-800 мм) та забезпечують продуктивність в межах від декількох до десятків кілограмів висушеного продукту на годину. Кількість послідовно розташованих зон сушіння (нагрівання МХ випромінюванням) може варіюватись від 3-4 до десятка і більше. Саме від цього параметра залежить загальна продуктивність сушильної установки, максимальна кількість видаленої вологи та електрична потужність, що споживається установкою.



Рис. 1 – Мікрохвильові сушильні апарати стрічкового типу

Зазначені вище параметри мікрохвильових сушильних установок, визначають максимально можливі режими обробки сировини. Найбільш важливий показник процесу - продуктивність по обробленій сировині, великою мірою залежить від характеристик самого матеріалу, що обробляється та технологічних обмежень на ведення процесу видалення вологи.

Особливістю мікрохвильового нагрівання як процесу, що лежить в основі роботи сушильного МХ обладнання є висока швидкість нагрівання вологих матеріалів, чим і обумовлена висока продуктивність мікрохвильового сушіння. Мікрохвильове поле дозволяє розігрівати і почати випаровувати вологу в рослинних матеріалах менше ніж за хвилину (при достатній потужності поля). Така швидкість процесу досягається при високих показниках енергопідведення для рослинних матеріалів на зразок зерна та бобових, та при відсутності технологічних обмежень на температурні режими обробки.

Нерівномірності напруженості електромагнітного поля в межах сушильної камери, і як наслідок нерівномірність нагріву вологи в матеріалі в межах шару сировини, дуже ускладнюють реалізацію технологічних режимів з високою інтенсивністю обробки сировини.

Іншою проблемою в контролі процесу інтенсивного мікрохвильового сушіння є неможливість прямого вимірювання температури внутрішніх шарів частинок матеріалу. Для сировини з частинками, що мають розміри понад 5-7 мм, в інтенсивних режимах обробки будуть виникати локальні перегріви у внутрішніх шарах частинок, особливо на завершальному етапі сушіння, коли вологи в частинках залишається небагато. Поверхневий контроль можливо реалізувати безконтактним способом, проте він залишатиметься недостатньо інформативним, оскільки температурне поле шару частинок матеріалу на виході зони обробки (сушильної камери) як правило досить нерівномірне і різниця температур поверхні окремих зон шару частинок може складати 10°C і більше в залежності від інтенсивності та етапу сушіння.

Аналіз останніх досліджень. Процеси мікрохвильового сушіння матеріалів рослинного походження все ще є недостатньо вивченими, що обумовлено новизною технології та великою різноманітністю в будові та

структурі рослинної сировини як об'єкту сушіння. Аналітичне моделювання процесів мікрохвильового сушіння є складним завданням з тих же причин. Роботи науковців даного напрямку [3-4], пропонують розглядати процес сушіння під впливом мікрохвильового підведення енергії як комплекс декількох взаємодіючих та взаємопов'язаних процесів, ініційованих відразу декількома основними рушійними силами:

- градієнт вологовмісту, який забезпечує і визначає кінетику процесу перенесення вологи між більш вологим центром частинок та їх поверхнею;
- градієнт температури між внутрішніми шарами вологої частинки і зовнішніми, який залежить від інтенсивності впливу мікрохвильового поля на вологу, що значно інтенсифікує процеси масопереносу вологи в напрямі від центру частинки до поверхні;
- градієнт тиску у внутрішніх шарах частинки матеріалу, який також може досягати великих значень і в інтенсивних режимах обробки матеріалу може перетягувати на себе ключову роль, в разі ініціації та сталого розвитку режиму механоцифозійного видалення вологи [5].

Зазначені градієнти мають однаковий напрям і впливають на інтенсивність процесу видалення вологи з капілярно – пористих систем (якими і є більшість рослинних матеріалів) різною мірою. Міра впливу для кожної з цих рушійних сил визначається як обраним режимом обробки вологого матеріалу так і поточними властивостями сировини (матеріалу, що обробляється). Відповідно до загальноприйнятої теорії конвективного сушіння, матеріал втрачаючи вологу значно змінює свої характеристики в процесі видалення вологи, чим обумовлено поділ процесу висушування на періоди саме сушіння та досушування. Таке твердження справедливе і для мікрохвильового сушіння з тією різницею, що на відміну від конвективного, при мікрохвильовому нагріванні температурний градієнт є співнаправленим з іншими, що робить практично невимірним та умовним перехід від етапу сушіння до досушування, тобто видалення вологи продовжується із падаючою швидкістю, але без різких її змін, до самого завершення процесу.

Зважаючи на складність процесу видалення вологи при МХ способі сушіння, науковою групою кафедри ПОтаЕМ ОНТУ обрано пріоритетним вектор експериментальних досліджень процесів МХ сушіння з наступною розробкою аналітичних моделей для досліджених реалізацій процесу.

В проведених науковцями кафедри ПОтаЕМ ОНТУ дослідженнях [6] встановлено, що залежність між інтенсивністю процесу МХ нагрівання та підведеною потужністю мікрохвильового електромагнітного поля, для вологих матеріалів рослинного походження, в технологічно допустимому діапазоні температур, близька до лінійної. Така ж залежність зберігається при масштабуванні процесу шляхом зміни навантаження сушильної камери.

Як висновок можна прийняти твердження про те, що при інженерному розрахунку МХ сушильних апаратів, їх конструктивні параметри слід обирати та нормувати виходячи з електричної потужності мікрохвильових генераторів (кВт), навантаження транспортної стрічки ($\text{кг}/\text{м}^2$) та бажаного максимального режиму енергопідведення ($\text{кВт}/\text{кг}$). Останній визначається експозицією сушіння (часом перебування матеріалу в сушильній камері) при мінімальній швидкості стрічки при її мінімально-доцільному навантаженні та при постійно ввімкнених МХ генераторах.

При умові використання обраного типу сировини такий набір параметрів визначає режим максимального енергетичного впливу на матеріал та відповідно максимальний для конкретної установки режим вилучення вологи. Для більшості МХ установок такий режим допустимий лише на першому етапі сушіння, коли вологи в матеріалі ще достатньо і ця волога лише починає розігріватись. На подальших етапах сушіння (в наступних після першої сушильних камерах) інтенсивність нагрівання доцільно зменшувати пропорційно кількості вологи, що залишається в матеріалі, незмінний енергетичний вплив, в другій половині процесу, приводить до подальшої надмірної інтенсифікації процесу видалення вологи, що супроводжується локальними перегрівками частини матеріалу, аж до обуглювання внутрішніх шарів частинок.

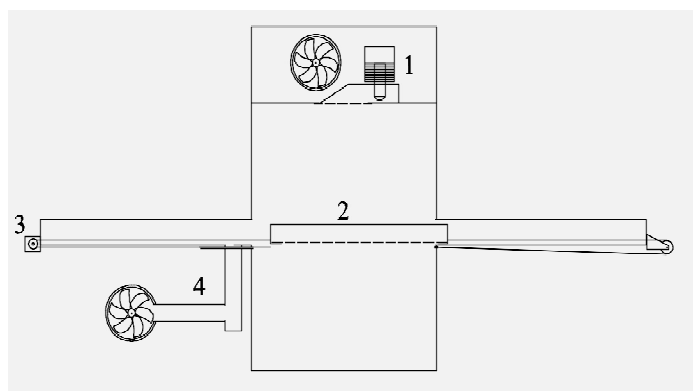
Для швидкого і бережливого до корисних властивостей матеріалу режиму видалення вологи доцільним виглядає сушильний регламент із зменшенням енергетичного впливу на рухомий шар сировини по мірі її висушування. Такий режим відносно легко реалізувати для модульної конструкції сушильної МХ установки, важливим параметром якої є кількість зон МХ нагрівання (сушильних камер). Встановлюючи для кожної з таких камер відповідний регламенту режим енергетичного впливу можна отримати процес сушіння адаптований під властивості конкретної сировини.

Колектив науковців кафедри ПОтаЕМ ОНТУ достатньо довго вивчає проблеми використання електромагнітного МХ поля в типових процесах переробки харчової сировини. Комплекс технічних рішень, розроблених на основі виконаних досліджень даного напрямку отримав власну назву – технології адресної доставки енергії. На базі таких конструкцій розробляються та пропонуються для впровадження інноваційні рішення для процесів сушіння, екстрагування, випарювання, стерилізації та інших.

Проведення експериментальних досліджень. Черговим етапом дослідження процесів видалення вологи з використанням мікрохвильового підведення енергії є розробка науково – дослідного стенду для дослідження кінетики процесу видалення вологи з шару сипучої рослинної сировини. Задача яку вирішує стенд полягає в фізичному моделюванні процесу висушування матеріалу при проходженні через сушильну МХ камеру. Схема та фото установки приведено на рис. 2.

Для забезпечення високої точності вимірювань та високої повторюваності умов експерименту, спроектовано та виготовлено одиночну сушильну камеру з фрагментами вхідного та вихідного каналів, через які механічний привід переміщає каретку з встановленою в ньому касетою. Плоска касета має розміри близькі до перетину камери і заповнюється в один – два шари зразком сипучого (або кускового) матеріалу, кінетику сушіння якого слід визначити. Привід каретки з касетою може рухатись з заданою оператором швидкістю в діапазоні від 1,5 до 11,5 мм/с. (діапазон може бути зміненим за потреби).

Джерелом МХ випромінювання в сушильній камері є магнетрон модифікації 2М217J від компанії Witol, електрична потужність якого складає 0,58 кВт. Касета прямокутної форми має розміри 19 x 18 см, що складає площу 0,0342 м². Розрахунковий енергопідвід, який створює установка до площі касети еквівалентний ~10 кВт/м² шару сировини (при 60% ефективності магнетрона). При типовому завантаженні касети в межах 200 гр. підведена еквівалентна потужність МХ випромінювання досягатиме 1,7 кВт/кг.



а)



б)

Рис. 2 – Дослідна установка: а) Схема: 1- магнетрон; 2-касета зі зразком матеріалу; 3-привід касети; 4-вентилятор та система продування шару продукту. б) фото установки (сушильна камера відкрита).

Керування стендом програмне, для зручності оператора передбачено безперервний та «однопрохідний» режими обробки. В останньому установка після кожного проходу вимикає магнетрон та встановлює каретку з касетою в позицію «паркування», для подальшого виймання касети оператором і її зважування на аналітичних вагах. Температурний контроль процесу здійснюється також оператором перед вийманням касети із зразком.

Методика дослідження полягає у встановленні заданої швидкості руху шару матеріалу (зразка в касеті) через сушильну камеру. Зразок сипучої сировини оператор розміщає в касеті, встановлює її в привід установки, закриває сушильну камеру і запускає процес. Відповідно до обраного режиму установка здійснює один цикл сушіння або продовжує послідовність циклів до зупинки процесу оператором. Після кожного циклу, або після групи циклів оператор здійснює контроль температури та маси зразка. Таким чином моделюється проходження зразка через задану кількість сушильних камер, для кожного з таких проходів можливо встановити власне значення експозиції сушіння змінюючи швидкість руху касети через сушильну камеру.

З метою розширення функціональності установки її обладнано ділянкою для моделювання процесу фільтраційного сушіння. Цей елемент стенду представляє собою щілинний, екранований від витоку МХ випромінювання проріз в нижній поверхні лівого транспортного каналу установки. Ширина поперечного прорізу складає близько 10 мм, що дозволяє ініціювати в ньому швидкість потоку повітря в межах 6-7 м/с. Більш детально результати дослідження комбінованого способу вологовидалення при сушінні рослинної сировини розглянуто в роботі [7].

Аналіз результатів. За даною методикою, проведено серію експериментів, метою яких була оцінка кінетики вологовидалення для двох різних видів рослинної сировини, в якості яких обрано різані «соломкою» яблука та боби гороху (з початковою вологістю понад 35%). Отримані в експериментах залежності відображено на рис 3 та 4.

Для дослідження кінетики видалення вологи з бобів гороху, зразок було попередньо зволожено і витримано в закритій тарі протягом декількох діб для отримання рівно зволжених по перетину горошин. Отримані показники в цілому відповідають очікуваним результатам, відображають високу ефективність способу МХ сушіння та доцільність продовження досліджень в даному напрямку.

Отримані залежності в цілому відповідають очікуваним результатам, відображають високу ефективність способу МХ сушіння та можливість використання розробленого науково-дослідного стенду і методики проведення експерименту для проведення досліджень кінетики видалення вологи із різноманітних зразків сипучої рослинної сировини з наступним формуванням довідкової бази показників масопередачі і типових «сценаріїв» процесу МХ сушіння.

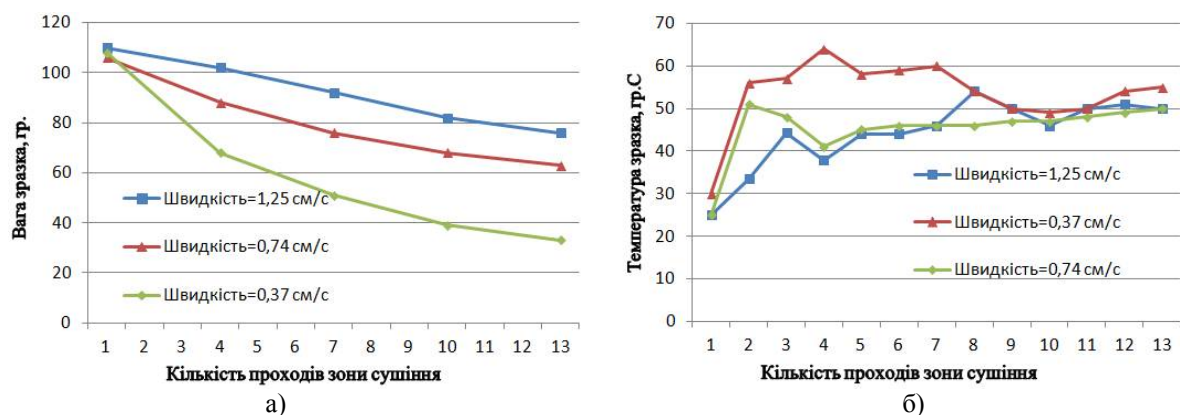


Рис. 3 – Процес видалення вологи з різних яблук

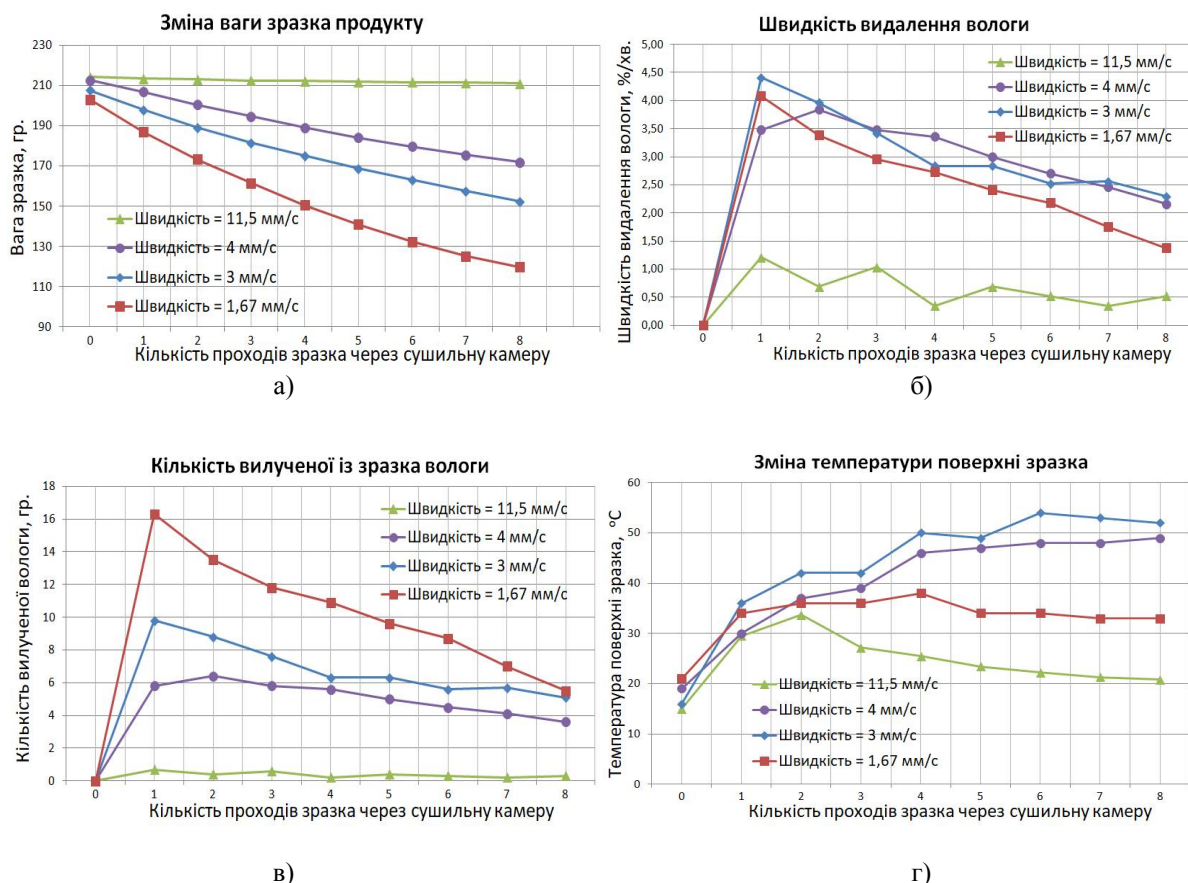


Рис. 4 – Кінетика процесу видалення вологи з бобів гороху

Висновки. Завершено розробку експериментального методу моделювання процесів видалення вологи в стрічкових мікрохвильових сушильних установках. Створений в ході роботи дослідний стенд забезпечує можливість моделювання адресного енергетичного впливу електромагнітного поля магнетрона на зразок сировини в формі плоского рухомого шару, аналогічний до впливу на шар сировини розміщений на стрічці транспортного конвеєра МХ сушарки стрічкового типу. Розрахункові показники енергопідведення, обмежені параметрами сушильної камери «донора» конструкції стенду, складають в еквіваленті до споживаної магнетроном електричної потужності $\sim 10 \text{ кВт/м}^2$ стрічки конвеєра та $1,7 \text{ кВт/кг}$ матеріалу, що обробляється. При максимальних параметрах енергопідведення, в дослідженні процесу вологовидалення з бобів гороху

отримано швидкість вологовидалення на рівні 4,5 %/хв., що цілком співвідноситься з попередніми дослідженнями. При менш інтенсивних режимах енергопідведення максимальні показники швидкості видалення вологи складають в середньому 2,5-3,0 %/хв.

References

1. Zhou, X. and Wang, S. (2018). Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review, *Drying Technol.*, 37, (3), 271. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>
2. Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., and Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends Food Sci. Technol.*, 17(10), 524. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.011>
3. Burdo, O.G., Terziev, S.G., Gavrilov, A.V., Sirotyuk, I.V., et al. (2020). System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials, *Problemy Region. Energ.*, 46, (1), 92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
4. Burdo, O.G., Trishin, F.A., Gavrilov, A.V., and Sirotyuk, I.V. (2021). Electrodynamics processes as an effective solution of food industry problems, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 57(3), 330. <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>
5. Yarovy, I., & Ali, V. (2020). Initsiyuvannya mekhanodyfuziynoho rezhymu volohovidvedennya v protsesakh znevodnennya rosllynnoyi syrovyny. *Scientific Works*, 84(1), 61-66. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1871>
6. Yarovy I. I. et al (2019). Innovatsiyni sposoby enerhopidvodu u protsesakh sushynnya termolabil'noyi syrovyny. *Innovatsiyni enerhotekhnolohiyi*, 17–23 <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/10062>
7. Bezbakh, I., Yarovy, I., & Voytenko, O. (2019). Kombinovani sposoby enerhopidvedennya v protsesakh sushynnya rosllynnoyi syrovyny. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>

PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS OF DEHYDRATION OF PLANT RAW MATERIALS IN BELT MICROWAVE DRYERS

Yarovy I.I., PhD, Associate Professor, Ali V.P., graduate student
Odessa National University of Technology, Odessa, Ukraine

Abstract. The article reflects the completed stage of scientific research. The general direction of scientific work is the implementation of targeted energy delivery technologies in the processes of drying, sterilization and heat treatment of nutrition products and raw materials.

The paper provides a brief analysis of the relevance of the scientific topic tagged with "microwave drying". A typical design of belt-type drying units is described. For most microwave devices, there is no systematized information about appropriate modes of wet materials processing as well as typical parameters of moisture removal processes, which complicates the possibility of their integration into existing technological processes. One of the factors of accelerating the development of microwave drying technologies can be the accumulation and systematization of information on appropriate regimes and limitations of MW drying processes for typical vegetable raw materials.

Experimental modeling of the moisture removal process in MW installations is considered as a reasonable way to research the processes of this type. It is proposed to investigate typical regimes for the processing of plant raw materials with the following systematization of the obtained dependencies.

Typical conditions of interaction of the microwave electromagnetic field and the moving layer of wet material in such installations should be simulated using a special stand and the appropriate methodology. The main task of the stand is to create conditions for accurate and convenient modeling of the effect of the MW radiation of the drying chamber on a sample of wet material with specified layer characteristics. The mode of material processing in a multi-zone dryer is simulated by repeating the passage of the sample through the drying chamber.

The design description of developed experimental stand is provided. The method of experiment realization is described. The raw materials used for the research are described. The resulting dependences obtained during the experiments are specified. A comparative assessment of the obtained results with previous studies is presented. The direction and tasks of the next stage of research are defined.

Key words: microwave drying, growing materials, combined drying methods.

Список використаної літератури

1. Zhou, X. and Wang, S., Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review. *Drying Technol.*, 2018, vol. 37, no. 3, p. 271. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>
2. Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., and Wang, S., Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends Food Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 10, p. 524. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.011>

3. Burdo, O.G., Terziev, S.G., Gavrilov, A.V., Sirotyuk, I.V., et al., System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials, *Problemy Region. Energ.*, 2020, vol. 46, no. 1, p. 92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
4. Burdo, O.G., Trishin, F.A., Gavrilov, A.V., and Sirotyuk, I.V., Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 3, p. 330. <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>
5. Яровий, І., & Алі, В. (2020). Ініціювання механодифузійного режиму вологовідведення в процесах зневоднення рослинної сировини. *Scientific Works*, 84(1), 61-66. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1871>
6. Інноваційні способи енергопідводу у процесах сушіння термолабільної сировини / І. І. Яровий, М. А. Кашкано, О. І. Маренченко, Є. О. Пилипенко // Інноваційні енерготехнології – 2019: зб. пр. VII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 9–13 верес. 2019 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса, 2019. – С. 17–23 : рис. – Бібліогр.: 9 назв. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/10062>
7. Безбах, І., Яровий, І., & Войтенко, О. (2019). Комбіновані способи енергопідведення в процесах сушіння рослинної сировини. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>

Отримано в редакцію 20.05.2022

Прийнято до друку 22.09.2022

Received 20.05.2022

Approved 22.09.2022