

УДК 621.311.68:631.563.2:66.047.3.086

КОМБІНОВАНІ СПОСОБИ ЕНЕРГОПІДВЕДЕННЯ В ПРОЦЕСАХ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ COMBINED METHODS OF POWER SUPPLY IN THE DRIVING OF VEGETABLE RAW MATERIALS

Безбах І.В., д-р. техн. наук, доцент, Яровий І.І., канд. техн. наук, доцент,
Войтенко О.К., канд. техн. наук, доцент
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса
I. Bezbakh, I. Yarovyi, O. Voitenko
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2019 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>DOI <https://doi.org/10.15673/swonaf.v2i83.1532>

Анотація. Означено проблематику процесів сушіння при використанні конвективних способів підводу тепла. Визначено ключові проблеми сушіння рослинної сировини – як матеріалів з розвинутою пористо – капілярною структурою. Визначено актуальність та доцільність пошуку нових способів сушіння, зокрема комбінованих. Визначено декілька перспективних технологій, що можуть стати складовими комбінованих способів сушіння. Описано причини обрання даного напрямку досліджень, місце дослідження в системі наукової діяльності наукового колективу, зв'язки з іншими дослідженнями.

Обґрунтовано актуальність дослідження та обрано способи дослідження декількох комбінацій способів сушіння. Визначено основні переваги однієї з обраних комбінацій способів підведення енергії – мікрохвильового та фільтраційного сушіння.

Визначено мету та зміст проведеного циклу дослідження. Визначено основну гіпотезу щодо можливості інтенсифікації досліджуваного процесу та основні фактори, що впливають на процес сушіння. Визначено передумови для організації та проведення експерименту.

Описано конструкцію та принцип дії установки для дослідження процесу вологовидалення при комбінованому підведенні енергії. Надано схему установки та опис процесу. Описано порядок проведення дослідження. Описано принципи керування процесом енергопідводу. Надано обґрунтування способу фізичного моделювання процесу сушіння в стрічковій сушильній установці. Визначено параметри процесу, що підлягають контролю в ході експерименту. Визначено кількісні та якісні параметри зразків матеріалу, що піддавались обробці. Надано зразки графіків параметрів, отриманих в ході експерименту.

Надано графіки отриманих залежностей. Виконано оцінку отриманих результатів. Визначено залежності кінетики процесу від питомої величини енергопідведення. Надано обґрунтування для удосконалення експериментальної мікрохвильової сушарки. Запропоновано спосіб внесення змін в конструкцію сушильних модулів стрічкової сушильної установки. Надано схему удосконалення конструкції модулів. Приведено висновки, щодо завершеного етапу дослідження.

Abstract. The problems of drying processes using convective methods of heat supply are defined. The key problems of drying of vegetable raw materials – materials with developed porous - capillary structure - are determined. The relevance and feasibility of finding new ways of drying, including combined ones, are determined. Several promising technologies have been identified that can become part of combined drying methods. The reasons for choosing this direction of research, the place of research in the system of scientific activity of the scientific team, connections with other studies are described.

The relevance of the study is substantiated and the methods of investigation of several combinations of drying methods are selected. The main advantages of one of the selected combinations of energy supply methods - microwave and filtration drying are determined.

The purpose and content of the study cycle were determined. The main hypothesis regarding the possibility of intensification of the studied process and the main factors influencing the drying process is determined. The prerequisites for organizing and conducting the experiment are identified.

The design and the principle of operation of the installation for the study of the process of moisture removal with combined energy supply are described. The installation diagram and process description is provided. The

procedure for conducting the study is described. The principles of control of the process of energy supply are described. The substantiation of the method of physical modeling of the drying process in the belt drying unit is provided. The process parameters to be controlled during the experiment are determined. The quantitative and qualitative parameters of the samples of material to be processed were determined. Samples of graphs of parameters obtained during the experiment are provided.

Dependency graphs are provided. The results were evaluated. The dependence of the kinetics of the process on the specific magnitude of the energy supply is determined. The rationale for improving the experimental microwave dryer is provided. A method of making changes to the design of the drying modules of the belt drying unit is proposed. The scheme for the improvement of the design of modules is given. Conclusions are made regarding the completed stage of the study.

Ключові слова: електромагнітні джерела енергії, мікрохвильові апарати, мікрохвильове сушіння, фільтраційне сушіння, комбіновані способи сушіння, сушіння рослинної сировини, інноваційні способи сушіння.

Keywords: electromagnetic energy sources, microwave apparatus, microwave drying, filtration drying, combined drying methods, drying of vegetable raw materials, innovative drying methods.

Вступ. Процеси сушіння вологих матеріалів були і залишаються одними з найбільш проблемних в харчовій та переробній промисловості. Проблематика процесів сушіння обумовлена відразу декількома факторами: об'єктом сушіння – органічною сировиною зі складною структурою і нелінійною зміною характеристик та комплексом корисних якостей, які в різній мірі деградують в процесі сушіння; складністю самого процесу сушіння (вологовидалення), що є комплексом декількох послідовно - паралельних масообмінних процесів з різними параметрами і рушійними силами; обмеженими та застарілими технологіями впливу на процес сушіння.

Конвективна теплопередача – як основний тип енергетичного впливу на об'єкт сушіння практично вичерпала свої можливості. Використання в традиційних сушарках проміжного теплоносія супроводжується обов'язковими втратами енергії: при генерації тепла, утворенні сушильного агента, його транспортуванні до об'єкту сушіння, передачі тепла від агента до матеріалу, що висушується, і лише в фіналі послідовності конверсій енергії здійснюється цільовий вплив – нагрівання вологи в матеріалі.

Конвективні технології сушіння, не зважаючи на відносну простоту реалізації та наявність величезної кількості інсталяцій, обмежені фізикою процесів теплопередачі і не мають потенціалу для значного покращення енергоефективності.

Інноваційного прориву доцільно очікувати серед конкуруючих, не конвективних способів сушіння, таких, що зможуть забезпечити мінімальну кількість конверсій, та менші втрати енергії при передачі енергії від генератора до вологи в матеріалі, що висушується.

Актуальність. Одним з конкуруючих способів енергопідведення є нагрівання вологих матеріалів в електромагнітному полі надвисокої частоти. Даний спосіб має багато переваг, деякі з яких гармонічно проявляються при обробці матеріалів з капілярно – пористими структурами, та є важливим, зокрема для харчових технологій, та має деякі обмеження, зокрема відносно складності реалізації сушильних установок та недостатньо високий (для сучасних технологій) к.к.д перетворення електричної енергії в надвисокочастотне електромагнітне поле. Технічні та законодавчі обмеження обумовили створення найбільш поширених і недорогих генераторів надвисокочастотного поля (магнетронів) з частотою коливань 2400 МГц, та потужністю в межах 1 кВт споживаної електричної енергії. Відповідно апарати на базі таких магнетронів називають мікрохвильовими (МХ).

Основною особливістю МХ сушильних апаратів є їх вплив безпосередньо на вологу, що міститься в матеріалі і практично без втрат на нагрівання самого матеріалу. Такий спосіб енергопідведення має високу ефективність і дозволяє швидко (безінерційно) керувати процесом підведення тепла. Дослідження переваг та обмежень даного способу сушіння проводилось зокрема в роботі [1].

Значні перспективи відкривають технології комбінованого сушіння, так науковцями кафедри досліджувалась комбінація МХ сушіння з інфрачервоним сушінням[2], значні переваги має комбінація МХ сушіння з вакуумуванням [3]. Комбіновані способи сушіння дозволяють поєднати переваги обох видів та компенсувати окремі обмеження кожного з них, внаслідок чого можна отримати спосіб сушіння можливо складний в технічній реалізації, проте з відмінними показниками продуктивності та/або якості висушеного продукту [4].

Одним з основних напрямів наукової діяльності кафедри ПОтаЕМ є пошук альтернативних способів енергопідведення для удосконалення існуючих та розробки інноваційних способів сушіння. Важливим сектором досліджень в цьому напрямі є розробка способів адресного (вибіркового) енергетичного впливу на нанорозмірні об'єкти – складові сировини органічного походження. Однією з технологій, що застосо-

вустється з цією метою є енергетичний вплив (нагрівання) на вологі матеріали надвисокочастотного електромагнітного поля, далі – мікрохвильове (МХ) сушіння.

Для проведення фізичного моделювання процесу МХ сушіння сипучих матеріалів створено експериментальну стрічкову сушильну установку (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд стрічкової сушильної установки ОНАХТ

Характеристики установки: кількість комбінованих (МХ+ІЧ) сушильних модулів: 3 шт.; частота МХ генераторів 2450 ± 50 МГц; потужність МХ: $\leq 2,4$ кВт; потужність ІЧ: $\leq 3,6$ кВт; швидкість стрічки конвеєра: 0-0,3 м/хв.; продуктивність: 3-10 кг/год.; габарити (д/ш/в): 3000х600х1200 мм.

Основним завданням, що реалізовується установкою – є створення базових умов для дослідження процесів, залежностей та обмежень мікрохвильового (електромагнітного) енергопідведення. В конструкцію установки закладено додаткову функціональність для реалізації комбінованого енергетичного впливу шляхом поєднання МХ сушіння з інфрачервоним (ІЧ) сушінням.

Конструкція установки дозволяє здійснювати контрольований і дозований вплив електромагнітним випромінюванням на матеріали, що транспортуються стрічковим конвеєром через три сушильних модулі, кожен з індивідуальним управлінням режимом електромагнітного випромінювання. Тривалість обробки матеріалу визначається швидкістю стрічки установки.

Результати проведених досліджень свідчать, що через велику кількість факторів, процес взаємодії МХ поля з рослинною сировиною, вкрай складно піддається аналітичному аналізу [5]. Саме тому основним напрямом робіт в дослідженні процесів електромагнітного енергопідводу при сушінні вологих матеріалів обрано шлях експериментального моделювання процесів, з подальшим аналізом отриманих результатів.

Мета та зміст досліджень. В рамках наукової школи професора О.Г. Бурдо сформовано та продовжує розвиватись теорія адресного енергетичного впливу на нанорозмірні об'єкти органічних структур (клітини, їх оболонки, капіляри, мікроорганізми тощо.). Тематика використання надвисокочастотного електромагнітного поля є основною серед механізмів формування такого впливу. Тематика цільового впливу МХ електромагнітним полем на харчові продукти та органічну сировину є актуальною для науковців кафедри, за даним напрямом виконано значну кількість наукових робіт.

Метою поточного етапу дослідження є експериментальне визначення потенціалу, можливостей та обмежень комбінованого способу сушіння з використанням МХ енергопідводу та принципів фільтраційного сушіння. Особливістю такої комбінації має бути значно більша ефективність та швидкість видалення вологості з поверхневих шарів частинок вологого продукту, і як наслідок - збільшення продуктивності комбінованого сушіння в цілому.

Гіпотеза полягає в наступному. Під впливом МХ поля в кожній з частинок вологого матеріалу виникають градієнти температури, тиску та вологовмісту, створюючи відповідні рушійні сили для переміщення вологості між шарами частинки в напрямі від центру до поверхні. Особливості МХ енергопідведення описані в роботах [1, 2, 3], автори акцентують відмінності МХ сушіння від конвективного та пояснюють високу продуктивність МХ сушіння саме співнаправленістю вищезазначених рушійних сил.

Іншим фактором, що визначає величину різниці потенціалів відповідного градієнта (величину рушійної сили для потоку вологи) є значення відповідного параметра на поверхні частинки. Величина рушійної сили, при інтенсивному потоці вологи до поверхні частинки буде поступово зменшуватись внаслідок зменшення кількості вологи у внутрішніх шарах частинки, а при недостатньо швидкому відведенні вологи від поверхні частинок градієнт вологості має зменшитись до несуттєвого значення.

Такий стан процесу характеризується появою значної кількості вологи на поверхні частинок матеріалу, що обробляється. Наявність такої поверхневої вологи погіршує умови процесу вологовидалення і зменшує його ефективність.

Швидкість вологовидалення з поверхні частинок обумовлюється параметрами повітряного середовища навколо шару вологого матеріалу і умовами циркуляції повітряного потоку в міжзерновому просторі шару та самій сушильній камері. В наявній конструкції МХ сушарки ці умови не є найкращими.

В разі використання комбінованого сушіння з МХ та ІЧ енергопідведенням відвід вологи з поверхні частинок дещо покращується за рахунок впливу ІЧ випромінювання, проте при недостатній швидкості транспортуючого повітряного потоку проблема зменшення рушійної сили волого відведення має залишатись актуальною.

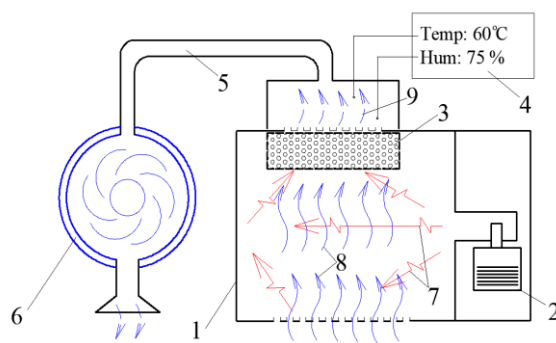
Виходячи з вищезазначеного, доцільно розглянути можливість інтенсифікації процесу вологовідведення в МХ сушарці за рахунок створення інтенсивного повітряного потоку, нормального до площини шару вологого матеріалу з швидкостями характерними для способів фільтраційного сушіння [6] (в межах 3...8 м/с), та параметрами, що відповідають нормальному стану атмосфери.

При такій організації процесу вологовідведення можна гарантувати високу швидкість відведення вологи з поверхні частинок та незмінність (в межах однієї сушильної камери) рушійної сили процесу.

Для дослідження процесу вологовидалення при такому комбінованому впливі розроблено стенд (рис. 2).



а) загальний вигляд



б) схема процесу,

1 – мікрохвильова камера, 2 – генератор МХ поля, 3 – касета з матеріалом, 4 – система вимірювання параметрів, 5 – повітропровід, 6 – вентилятор, 7 – випромінювання, 8 – сухе (атмосферне) повітря, 9 – вологе повітря.

Рис. 2 - Установка для дослідження комбінованого сушіння (мікрохвильового і фільтраційного)

Стенд складається з МХ камери 1, в якій розміщена касета з вологим матеріалом 3, фізичні розміри касети обрані еквівалентними ділянці шару матеріалу розміщеного на стрічці сушарки. Через шар матеріалу в касеті вентилятором 6 продувається потік атмосферного повітря. Вимірювання параметрів процесу вологовидалення контролюється шляхом прямих вимірювань маси касети і вологості матеріалу перед і після обробки.

Безпосередньо хід процесу вологовидалення контролюється за непрямими параметрами – вологістю та температурою потоку повітря який пройшов через касету та за температурою вологого матеріалу в касеті. Принцип керування процесом комбінованого сушіння в даному випадку полягав у послідовному, нормованому в часі періодичному впливі на тестовий зразок (шар вологого матеріалу в касеті) МХ випромінюванням та продуванням шару потоком атмосферного повітря.

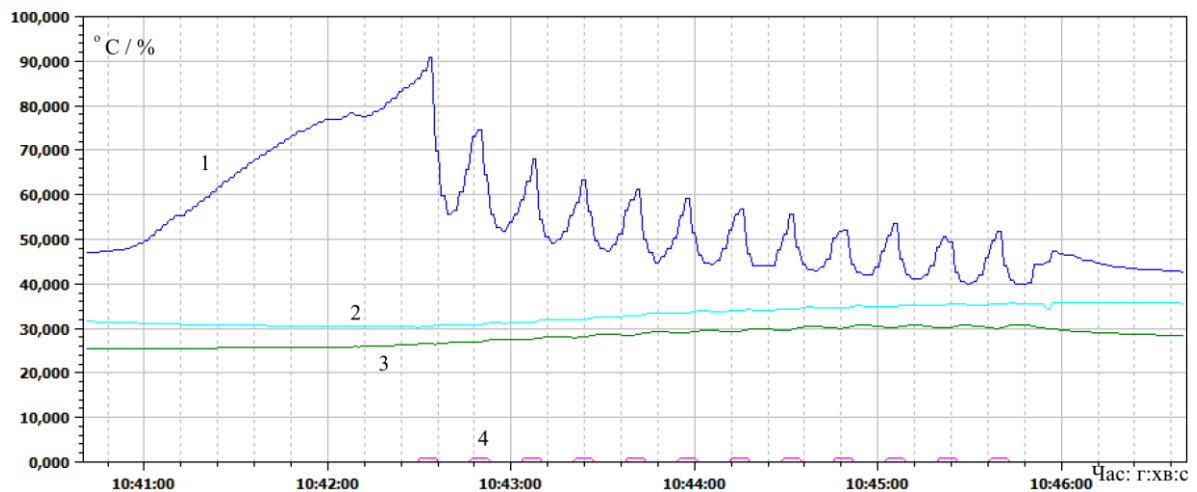
Такий спосіб керування моделює послідовне нагрівання шару МХ випромінюванням при проходженні сушильних камер та інтенсивне продування шару при проходженні відповідних зон фільтраційного сушіння.

Тривалість таких впливів має визначатись величиною відповідних зон та швидкістю руху стрічки через зони сушіння.

Результати експериментальних досліджень. В ході дослідження визначалась кінетика комплексного впливу МХ енергопідведення та фільтраційного сушіння на процес вологовидалення з шару вологого матеріалу з капілярно – пористою структурою. В ході тестових сушінь, в якості зразків рослинної сировини використовувались невеликі (150-350 г.) об'єми пшениці, кукурудзи та гороху. В подальшому, для визначення досліджуваних залежностей, як модельна сировина, використовувались боби гороху.

Важливими параметрами процесу є тривалість обробки зразка МХ випромінюванням та продувки повітрям. В ході проведеного дослідження визначались основні залежності між кількістю підведеної енергії та інтенсивністю вологовидалення.

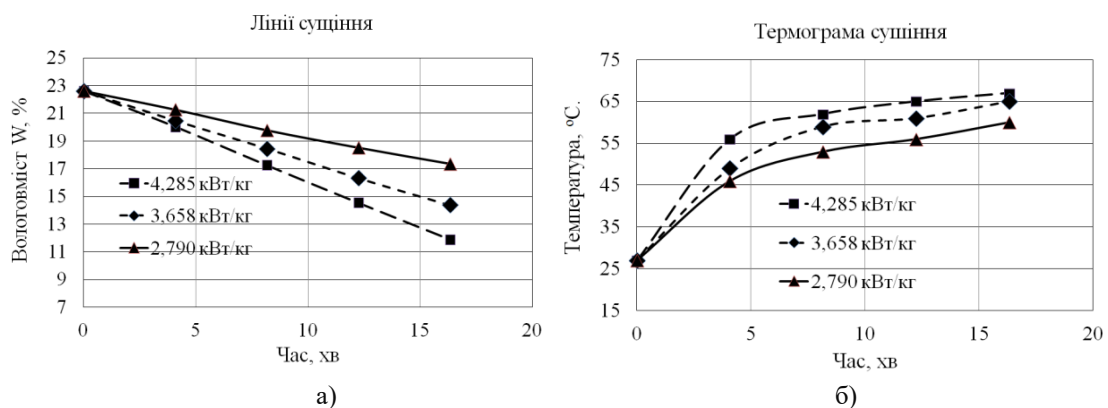
На рис. 3 приведено типові для даної серії експериментів зміни вологості та температури потоку повітря після його проходження через касету з матеріалом що піддається обробці. Графіки відображають зміну параметрів процесу при навантаженні сушильної камери шаром вологого зерна висотою 20 мм, площею 0,0132 м², масою 140 г. З метою отримання проміжних параметрів шляхом прямих вимірювань дослід проводився в три етапи між якими проводилось зважування касети на лабораторних вагах.



1 – вологість повітряного потоку на виході касети; 2 – температура шару вологого матеріалу в касеті; 3 – температура повітряного потоку на виході касети; 4 – імпульси керування вентилятором продувки

Рис. 3 - Графіки зміни параметрів під час першої групи циклів сушіння

Проведено дослідження залежності параметрів процесу сушіння від навантаження камери, і відповідно від величини енергопідведення. Моделювання зміни навантаження здійснювалось вибором трьох розмірів касети, товщина шару матеріалу залишалась незмінною 20 мм., площа шару становила: 0.0088 м², а маса матеріалу - 140 г.; 0.0132 м², матеріал - 164 г.; 0.0176 м², матеріал - 215 г.. Зазначені параметри, при потужності магнетрона 0,6 кВт відповідають питомому енергопідведенню: 4.285, 3,658 та 2,790 кВт/кг відповідно. В результаті серії дослідних сушінь отримано залежності (рис. 4).



а) лінії сушіння; б) термограма.

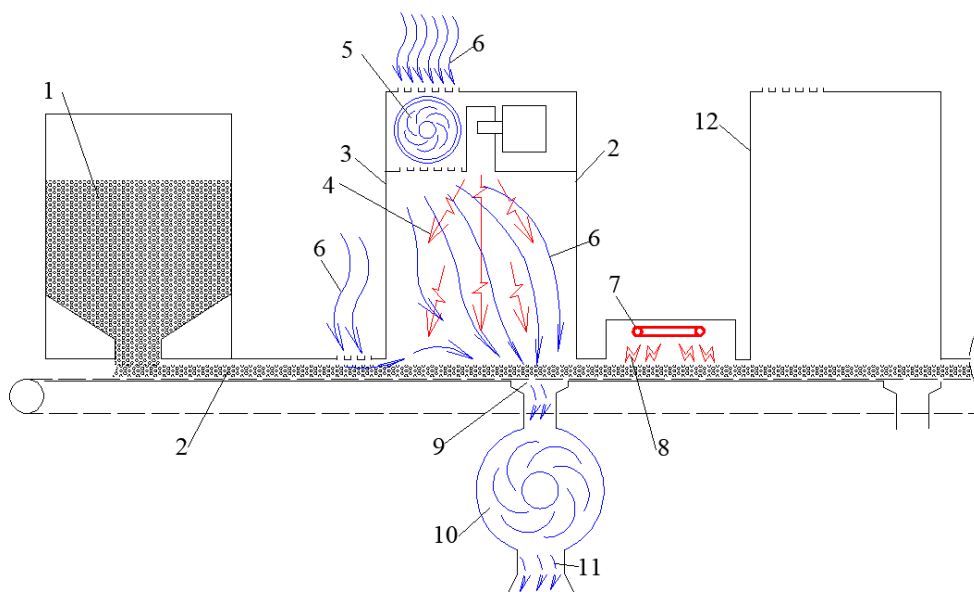
Рис. 4 - Характеристики процесу комбінованого МХ та фільтраційного сушіння при зміні величини енергопідведення (навантаження камери)

Аналіз отриманих даних. Так як основною рушійною силою процесу сушіння для даного способу є мікрохвильове нагрівання вологи, що міститься в частинках матеріалу, результати експериментів підтверджують основні залежності МХ сушіння. В ході дослідження визначено і основні технічні обмеження характерні для параметрів наявної МХ камери та магнетрона.

Визначено достатню площу та висоту шару матеріалу в камері сушіння та доцільну швидкість повітряного потоку для фільтраційного сушіння.

В результаті проведених досліджень підтверджено ефективність комбінованого способу сушіння, що поєднує мікрохвильове енергопідведення та фільтраційне сушіння.

Підтверджено доцільність модернізації існуючої дослідної сушильної установки з комбінованим МХ та ІЧ енергопідведенням, блоком фільтраційного сушіння. Запропоновано удосконалену конструкцію комбінованої сушильної камери для реалізації МХ та фільтраційного сушіння. Сушильні камери розробленої на кафедрі МХ сушарки (рис.1) мають бути доповнені вентиляторами для продування шару сировини. Варіант такої модернізації зображено на рис. 6.



1 – бункер з вологим матеріалом, 2 – шар вологого матеріалу, що рухається на сітчастій транспортній стрічці, 3 – перший сушильний модуль, 4 – МХ випромінювання, 5 – вентилятор, 6 – потоки сухого повітря, 7 – ІЧ сушильний модуль, 8 – ІЧ випромінювання, 9 – зона фільтраційного сушіння, 10 – вентилятор, 11 – потік вологого повітря, 12 – наступний сушильний модуль.

Рис. 6. Схема удосконаленого сушильного модуля сушильної МХ установки

Висновки. Проведено апробацію способу експериментального моделювання режимів роботи багатозонної стрічкової МХ сушильної установки шляхом обробки нерухомого шару вологого матеріалу в одиначній сушильній МХ камері.

Розроблений спосіб дозволяє моделювати процес МХ сушіння зразка у великому діапазоні режимних параметрів.

Перевірено можливість контролю інтенсивності процесу вологовидалення в МХ сушильній камері за параметрами повітряного потоку, що транспортує видалену вологу (рис. 3).

Такий спосіб контролю дозволяє проводити оперативний контроль інтенсивності вологовидалення та давати оперативну оцінку ефективності заданого режиму обробки матеріалу.

Проведено експериментальне дослідження кінетики вологовидалення з при комбінованому способі сушіння, з енергопідведенням МХ електромагнітним полем та одночасною інтенсифікацією вологовидалення вивільненої вологи фільтраційним сушінням (схема установки: рис. 2б), запропоновано варіант модернізації існуючої експериментальної МХ сушарки (рис. 6).

Встановлено, що залежність між швидкістю вологовидалення та потужністю енергопідведення, в діапазоні характерному для наявної сушильної камери близька до лінійної і в діапазоні конструктивно доцільних навантажень установки складає від 0,4 до 0,6 %/хв. Прим.: швидкість вологовидалення може бути значно вищою після удосконалення конструктивних характеристик експериментального стенду.

Визначено доцільне, для потужності наявного в сушильній камері МХ генератора, навантаження сушильної камери, яке в залежності від обраного температурного режиму має складати, при площі шару в 0,02 м² та товщині шару до 0,02 м, масу в межах 200...300 г., та діапазон швидкостей повітряного потоку на ділянці фільтраційного сушіння, який доцільно задавати в межах 5...8 м/с.

Література

1. Бурдо, О.Г., Терзиев, С.Г., Бандура В.Н., Яровой, И.И. Механодиффузионный эффект - новое явление в тепломассопереносе: ММФ. Минск, Белорусь, 2016. №3, С. 224-228.
2. Яровий, І., Кашкано, М., Маренченко, О., & Пилипенко, Є. Іноваційні способи енергопідведення у процесах сушіння термолабільної сировини. Scientific Works, № 83(1), 2019. С. 122-128. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1429>
3. Burdo, O., Povarova, N., & Melnyk, L. Kinetics and energy of poultry meat dehydration in vacuum and microwave field conditions. Food Science and Technology, 2019. № 12(4). <https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1218>
4. Erhan Horuz, Hüseyin Bozkurt, Haluk Karataş, Medeni Maskan, Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. Food Chemistry, Volume 230, 2017, Pages 295-305, ISSN 0308-8146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.046>.
5. Dunaeva T. and Manturov A., "The phenomenological model microwave drying kinetics of food products," 2010 International kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves, Kharkiv, 2010. pp. 1-3. doi: 10.1109/MSMW.2010.5546094
6. Атаманюк, В.М., Гумницький Я. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Монографія. – Львів.: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 276 с.

References

1. Burdo, O.G., Terziyev, S.G., Bandura, V.N., Yarovoy, I.I. (2016). Mekhanodiffuzionnyy effekt – novoye yavleniye v teplomassopere-nose: MMF. Minsk, Belorus'. 224-228. 3.
2. Yarovy, I., Kashkano, M., Marenchenko, O., & Pylypenko, YE. (2019). Inovatsiyni sposoby enerhopidvedennya u protsesakh sushinnya termolabil'noyi syrovyny. Scientific Works, 83(1), 122-128. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1429>
3. Burdo, O., Povarova, N., & Melnyk, L. (2019). Kinytyka ta enerhetyka znevodnennya m'yasa ptytsi v umovakh vakuumu ta mikrokhvyl'ovoho polya. Food Science and Technology, 12(4). <https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1218>
4. Erhan Horuz, Hüseyin Bozkurt, Haluk Karataş, Medeni Maskan, (2017). Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. Food Chemistry, Volume 230, 2017, Pages 295-305, ISSN 0308-8146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.046>.
5. T. Dunaeva and A. Manturov, "The phenomenological model microwave drying kinetics of food products," 2010 International kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves, Kharkiv, 2010, pp. 1-3. doi: 10.1109/MSMW.2010.5546094
6. Atamanyuk, V., Humnyts'ky, YA. (2013). Naukovi osnovy fil'tratsiynoho sushinnya dyspersnykh materialiv. – L'viv.: vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniki. 273.

Cite as

Безбах І.В., Яровий І.І., Войтенко О.К. Комбіновані способи енергопідведення в процесах сушіння рослинної сировини // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2019. Т. 83, вип. 2. С. 71 – 77.

Отримано в редакцію 11.07.2019

Прийнято до друку 10.09.2019

Received 11.07.2019

Approved 10.09.2019