

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОЛОГИ В БАГАТОЗОННИХ МІКРОХВИЛЬОВИХ СТРІЧКОВИХ СУШАРКАХ

Яровий І.І., к.т.н., доцент, Коцур І.О., аспірант, Анцефоров В.О. магістр,
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Показано актуальність процесів сушіння для сучасної промисловості та перспективність мікрохвильового способу сушіння та комбінованих способів на його основі. Наведено приклади реалізації технологій мікрохвильової обробки сировини (сушіння як базова технологія) зарубіжними виробниками, та приведено узагальнену оцінку найбільш суттєвих переваг мікрохвильової обробки вологих матеріалів. Нада-но обґрунтування вибору модульної конструкції для стрічкового універсального мікрохвильового сушильного апарата з широким спектром режимів обробки вологих сипучих матеріалів рослинного походження. Розглянута можливість використання експериментального способу параметризації процесу сушіння шляхом моделювання в багатозонних стрічкових мікрохвильових установках шляхом моделювання кінетики процесу сушіння в тестовому стенді з періодичною обробкою сировини (вологого матеріалу) в камері мікрохвильового впливу з заданою кількістю ітерацій. Перевірено дослідним шляхом можливість інтенсифікації процесу вологовідведення ініціацією механодифузійного режиму вологоперенесення на початковому етапі сушіння, визначено необхідні умови та обмежуючі фактори для утворення та повторення такого режиму вида-лення вологи в кожній наступній ітерації. Запропоновано обґрунтування для використання такої комбінації технологій видалення вологи та впливу механодифузійного ефекту і фільтраційного способу видалення во-логи на кінцеву продуктивність такого комбінованого способу сушіння. Експериментально доведено для одного з типових видів сировини (гороху) можливість реалізації комбінованого мікрохвильового сушіння поєднаного з фільтраційним сушінням. Встановлено, що для сировини дослідженого виду ефективність комбінованого способу сушіння має типові залежності і пропорційна тривалості та потужності мікрох-вильового періоду сушіння і мало залежить від тривалості циклу фільтраційного сушіння. Описано загальні принципи конструкції стрічкової, модульної сушильної установки з комбінованим способом сушіння сипкої рослинної сировини. Запропоновано конструкцію промислового зразка мікрохвильової стрічкової сушильної установки з модульним дизайном та можливістю реалізації комбінованого способу сушіння.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, комбіноване сушіння, фільтраційне сушіння, сушіння гороху, механодифузія.

Вступ. Процеси сушіння є невід'ємною та фундаментальною складовою технологічних циклів у харчо-вій та переробній промисловості. Ключова роль сушіння визначається не лише можливістю значно збільши-ти термін зберігання вологої сировини, що є критично важливим для мінімізації непродуктивних втрат та забезпечення харчової безпеки готової продукції, але й суттєвим економічним ефектом. Для окремих видів сировини, шляхом видалення вологи, яка може становити до 90% від загальної маси сировини, використан-ня сушіння на ранніх етапах її переробки дозволяє знизити вагу та об'єм, що в свою чергу значно оптимізує логістичні витрати та спрощує транспортування. Зниження вологості сировини до технологічних норм, що мінімізують або унеможливають біохімічні та мікробіологічні процеси в сировині є основним способом її консервування для довготривалого зберігання, що дозволяє ефективно розподіляти та планувати подальшу переробку сировини, оптимізувати навантаження та режими технологічних ділянок переробних підпри-ємств.

Актуальність. За різними оцінками, енерговитрати на сушіння харчової сировини можуть становити від 15% до 25% загального енергоспоживання переробного підприємства. У зв'язку з цим, пошук, розробка та впровадження більш ефективних, енергозберігаючих та ресурсощадних методів сушіння є пріоритетним напрямом досліджень для багатьох наукових колективів, університетів та інженерних компаній по всьому світу. Метою більшості таких досліджень є не тільки зниження енергетичних витрат процесу видалення вологи, а й підвищення якості готового (висушеного) продукту, що відповідає зростаючим вимогам техно-логів щодо збереження в готовому продукті максимальної кількості первинних корисних компонентів сиро-вини, її смаку, кольору та аромату.

Традиційні методи сушіння. Незважаючи на постійний прогрес у галузевій інженерії, матеріалознавст-ві та технологічних науках, сушіння продовжує залишатися одним із найбільш енергоємних процесів в про-мисловості. Найбільш поширеним методом є конвективне сушіння. Конвективний метод використовує для передачі тепла від його джерела до поверхні сировини гаряче повітря - сушильний агент. Цей спосіб тепло-передачі має свої переваги, він просто реалізується з величезною кількістю конструкцій адаптованих під різні види сировини, реалізується відносно простим і відповідно недорогим обладнанням, може достатньо просто масштабуватись для обробки великих потоків сировини. Ці переваги дозволяють конвективному

сушінню залишатись актуальним способом в багатьох галузях, зокрема в тих де відсутні альтернативи, а його недоліки менш виражені.

Недоліків конвективних технологій сушіння, тобто реалізованих за принципом конвективної теплопередачі, не менше ніж переваг: низька енергоефективність та висока ціна як наслідок використання цінного палива (природного газу), значна тривалість процесу сушіння, особливо при використанні “м'яких” режимів обробки, значні ризики перегріву поверхні продукту, що призводить до небажаних і суттєвих втрат корисних компонентів сировини, зміни кольору, смаку та зовнішнього вигляду готового продукту. Ці недоліки в різній мірі присутні у всіх реалізаціях конвективних сушильних технологій, і в залежності від ступеню їх прояву, виробники та споживачі сушильного обладнання не лише продовжують удосконалювати існуюче сушильне обладнання а й ведуть активний пошук нових способів сушіння.

З вищезгаданих недоліків найбільш суттєвим є невисока енергетична ефективність самого процесу конвективної передачі, цей недолік неможливо компенсувати або мінімізувати без зміни фізики процесу та без зменшення кількості конверсій видів енергії від енергії палива до тепла вологи у внутрішньому об'ємі частинок сировини, що висушується [1]. В умовній конвективній сушарці енергія проходить п'ять етапів перетворень та зміни потенціальних рівнів: хімічна енергія палива перетворюється в тепло продуктів його згоряння, змішуванням з атмосферним повітрям зменшується потенціал продуктів згоряння до необхідного для сушильного агента, далі цей потік транспортується до вологого матеріалу і шляхом змішування (продування) сушильного агента з частинками цього матеріалу створюються умови для тепломасообмінного процесу між потоком сушильного агента та поверхнею частинок вологого матеріалу і лише як результат такого тривалого ланцюга перетворень, тепло від поверхні частинок передається внутрішнім їх шарам одночасно з ними нагріваючи цільовий компонент - вологу, що в них знаходиться. Загальна кінетика такого процесу визначається кількома параметрами на кожному етапі, тож не дивно, що сушіння залишається одним з найскладніших серед технологічних процесів харчової галузі.

Висока питома теплота пароутворення води вимагає значних витрат енергії для її переведення з рідкого стану в газоподібний, що практично не залишає шансів для винайдення способів зниження вологи матеріалу з енерговитратами нижчими ніж теоретичний мінімум в 0,63 кВт/год (2260 кДж/кг), необхідний для її випарювання. В реальних процесах, коли нагріванню піддається не лише волога а й сам матеріал сировини, матеріал конструкції сушарки та тепловий агент, то разом з непродуктивними тепловими втратами тепла в навколишнє середовище (з відпрацьованим агентом та нагрітими поверхнями конструкцій) енергетичні витрати на випарювання 1 кг вологи для кращих зразків зерносушарок за рекуперацією тепла сушильного агента складають 3,8 - 4,0 МДж/кг і можуть досягати 7,0 МДж/кг і більше для таких видів сушильної техніки як барабанні та стрічкові сушарки (в залежності від режимів обробки та характеристик сировини).

Зменшити енергетичні витрати в процесах сушіння можливо лише ситуативно, на окремих етапах або в окремих режимах. Усунути загальний для конвективних способів сушіння недолік - неефективну передачу тепла від його джерела до вологи в матеріалі можливо лише відмовившись від функції сушильного агента та змінивши спосіб теплопередачі [2].

Інші традиційні методи сушіння займають невелику за обсягом долю серед технологічних процесів галузі і не є прямими конкурентами конвективному сушінню. Наприклад, вакуумне сушіння, процес якого відбувається при зниженому тиску і відповідно з меншою ніж 100 °С температурі кипіння води. Метод ідеально підходить для термолабільної сировини, але є більш витратним і технічно складним внаслідок використання вакууму. Ще один приклад - сублімаційне сушіння, процес видалення вологи відбувається шляхом прямого переходу льоду в пару (сублімації) в умовах глибокого вакууму. Процес дозволяє максимально зберегти структуру, колір та корисні властивості продукту, однак є одним найдорожчих способів, що значно обмежує його застосування.

Інноваційні методи сушіння. Один з найбільш перспективних напрямів у пошуку нових способів сушіння, які будуть вільні від недоліків традиційних технологій, базується на використанні електромагнітної енергії. Основним з таких способів є мікрохвильове (МХ) сушіння [3]. Основною відмінністю мікрохвильового сушіння від традиційних способів є принцип нагрівання вологи в матеріалі. Мікрохвилі проникаючи всередину матеріалу, взаємодіють з молекулами води по всьому об'єму вологих частинок матеріалу, що забезпечує майже миттєвий початок процесу розігрівання вологи та її рівномірне подальше видалення. Висока швидкість процесу нагрівання вологого матеріалу при “адресному” підведенні енергії безпосередньо до молекул води визначає високу продуктивність МХ сушіння, забезпечує високу контрольованість процесу нагрівання, його самовирівнювання, відсутність перегріву поверхностей частинок та нижчі температури процесу, і як наслідок - кращі показники збереження якісних показників продукту. До переваг МХ сушіння також відносять високу екологічність, так як відсутні будь які викиди в навколишнє середовище а для нагрівання використовується лише електрична енергія, універсальність технології - можливість використання МХ установок як для сушіння різних видів сипучої сировини (боби, зерна, трави, деталі, тощо.) так і для стерилізації сировини і готової (навіть упакованої) продукції, біоактивації насіння та досушування або попереднього нагріву матеріалу в тандемі з традиційними видами сушіння.

Як недоліки, у МХ сушіння визначають наявність ризику нерівномірного нагріву внутрішньої структури частинок вологого матеріалу, який зростає при інтенсивних режимах сушіння, недостатньо високий к.п.д.

перетворення електричної потужності в електромагнітне МХ поле, відносно невелику продуктивність МХ сушарок, якої недостатньо для обробки великих потоків сировини на зразок пшениці. До недоліків також відносять високу вартість як капітальних так і експлуатаційних витрат на спеціалізоване обладнання для створення МХ випромінювання необхідної потужності.

Зважаючи на таку комбінацію переваг та недоліків, технології МХ сушіння все ще залишаються спеціалізованим продуктом, розвиваючись в тих галузях де такі їх переваги як: швидкісне сушіння, об'ємний нагрів, багаторежимність і керованість та можливість супутньої стерилізації сировини чи продукту є визначальними. Узагальнений огляд МХ обладнання представленого на азійському ринку дозволяє зробити висновки про типи МХ обладнання, що пропонується та моделі його використання в технологічних процесах. Пропозицій МХ обладнання на відомому китайському сайті не просто багато, запит за ключовими словами "microwave drying machine" видає понад сотню сторінок і близько трьох тисяч позицій. Видача має багато дублювань, проте наявність навіть третини чи десятої частини оригінальних пропозицій дозволяє зробити висновок про обсяг ринку МХ сушіння [4].

Серед пропозицій мають місце: тунельні (стрічкові, безперервні) сушарки, камерні (періодичної дії) - атмосферні та вакуумні, лабораторні установки, апарати для прискорення хімічних реакцій та інше МХ обладнання. Вартість рішень коливається в широких межах, стартуючи від ~ 3 - 10 тисяч USD і до 30 тисяч USD (в середньому) за один комплекс. За своїм призначенням МХ обладнання позиціонується як багатопрофільне пропонуючи режими обробки для різних матеріалів від типової сировини: фруктів, бобових, кавових зерен, спецій, чаю та трав до сушіння комах, м'яса, стерилізації органічних матеріалів, полімеризації пластиків та обробки деталей з дерева. Характерним показником МХ обладнання є споживана електрична потужність, в доступних специфікаціях МХ обладнання фігурують цифри від 10 кВт до сотні і навіть більше на одну установку. При цьому більшість виробників ведуть гнучку політику пропонуючи масштабуємі рішення з різними продуктивністю, потужністю та габаритами, а відповідно і ціною, пристосовуючись таким чином до потреб споживача. Загальний вид конструкцій саме стрічкових МХ сушарок дає можливість зробити висновок про те, що типовий дизайн та технічні рішення для такого обладнання вже визначено і відпрацьовано виробниками, а МХ сушіння поступово переходить з категорії інноваційних технологій до виробничих. Тож наступним етапом розвитку сушильних МХ технологій має бути їх удосконалення, пошук можливостей для підсилення переваг МХ сушіння та компенсування чи мінімізації недоліків а також адаптація типових технічних рішень до конкретних умов, регламентів та ділянок харчових виробництв.

Обґрунтування напрямку дослідження. Як наступний етап розвитку технологій МХ сушіння розглядається можливість комбінування МХ сушіння з іншими технологіями [5-9]. Наприклад, комбінація мікрохвильового і конвективного сушіння дозволяє мінімізувати недоліки кожної з технологій і забезпечити високу ефективність процесу при максимальному збереженні вихідної якості висушеного продукту. Пошук оптимальних варіантів серед комбінованих технологій сушіння є актуальною тематикою досліджень і для модернізації сушильного обладнання. Серед найбільш перспективних комбінованих з МХ способів сушіння можна назвати комбіноване з інфрачервоним сушінням, з вакуумним, з конвективним в декількох варіантах. Якщо аналізувати такі комбіновані варіанти з позиції енергоефективності, то однозначних висновків про їх економічність зробити не можна, енергетичні витрати при таких комбінованих варіантах будуть суттєво збільшуватись порівняно з чистим МХ сушінням.

Серед традиційних способів, що претендують успішно на комбінування з мікрохвильовим сушінням можна розглянути механічне відведення вологи як найбільш енергоефективне [10]. Питанням залишається спосіб виділення вологи з частинок матеріалу при якому може утворюватись поверхнева волога яку в подальшому можливо відділити від потоку матеріалу механічним способом.

Визначення мети та завдань дослідження. Якщо розглянути можливість ініціалізувати в процесі МХ сушіння механодифузійний режим [11] для виведення вологи на поверхню частинок, а в якості процесу для механічного розділення потоку матеріалу і виведеної на поверхню вологи використати принципи фільтраційного сушіння, то виникає можливість створити комбінований спосіб з високою енергоефективністю, теоретично - з енерговитратами меншими від енергетичного мінімуму в 2260 кДж/кг по відведеній волозі. Для реалізації цієї мети слід вирішити наступну послідовність задач: визначити умови та обмеження для утворення стійкого механодифузійного режиму вологовидалення з утворенням на поверхні частинок шару вільної вологи достатнього для механічного видалення; визначити достатні параметри повітряного потоку для процесу фільтраційного вологовидалення з потоку тонкого шару обробленої МХ полем сировини; розробити та реалізувати методику дослідження запропонованого комбінованого способу сушіння.

Теоретичні основи процесу. Фізичні принципи нагрівання вологого матеріалу в електромагнітному мікрохвильовому полі достатньо добре вивчені та описані в багатьох роботах, наприклад [12-14]. Основною рушійною силою процесу нагрівання вологи є потужність електромагнітного МХ поля, яка і визначає інтенсивність "молекулярного тремтіння" молекул води в матеріалі і відповідно кількість тепла яке виділяється при такій взаємодії. Особливістю МХ нагрівання є також співнаправленість градієнтів вологості, температури і тиску, що виникають внаслідок МХ впливу, всі вони однаково направлені, від центру кожної частинки матеріалу до її поверхні. При достатній кількості вільної вологи в частинках матеріалу, при інтенсивному МХ нагріванні, у внутрішніх, найбільш вологих шарах частинок, зокрема в капілярах, мають виникати обла-

сті з високою температурою та тиском, які створюватимуть між внутрішніми шарами та поверхнею частинок інтенсивні потоки вологи, у вигляді випареної та вільної води. Вільна волога “виштовхнута” паровими пухирями з капілярів об’єму частинок на її поверхню може залишитись не випареною, внаслідок недостатньо високої температури поверхні частинок. Такий фізичний ефект описаний як “механоцифуза” більш детально розглянуто в роботі [15]. Наступним етапом має бути фільтраційне сушіння, яке в даному варіанті процесу полягатиме в інтенсивному продуванні шару матеріалу атмосферним повітрям з швидкістю потоку достатньою для “зривання” шару вологи з поверхні частинок матеріалу і виведенням її у вигляді капель за межі сушильної зони, без витрат енергії на її випарювання.

Для реалізації описаного способу сушіння необхідно виконати декілька умов: висушуваний матеріал повинен мати частинки з достатньою кількістю вологи, тоді інтенсивне МХ нагрівання високовологого матеріалу буде мати невеликий вплив на його первинні якісні характеристики, шар матеріалу має бути достатньо тонкий та повітрепроникний для ефективного продування шару повітрям. По мірі зменшення кількості вологи в матеріалі ефективність комбінованого режиму буде падати. Контролюючи кількість видаленої продувом вологи слід визначити момент завершення етапу комбінованого сушіння і перейти до простого МХ сушіння знизивши при цьому інтенсивність МХ нагрівання не припиняючи при цьому «вентилювання» шару матеріалу.

Матеріали та методи дослідження: Об’єктом дослідження процесу зневоднення рослинної сировини з використанням технологій мікрохвильового та фільтраційного сушіння. Предметом даного дослідження є кінетика видалення вологи з тонкого, рухомого шару рослинної сировини під впливом комбінації циклічної дії МХ поля та продувки повітрям.

Виходячи з типового для стрічкових МХ сушарок конструктиву у вигляді послідовного розташування МХ камер об’єднаних спільним тунелем для проходження конвеєрної стрічки з плоским шаром матеріалу,



Рис. 1 – Загальний вигляд дослідного стенду: зліва – вентилятор продувки, справа – МХ камера (мікрохвильова піч) з фрагментами транспортних тунелів, всередині камери - касета з матеріалом.

що обробляється, для експериментального моделювання даного процесу було виготовлено дослідний стенд у вигляді однієї МХ камери з фрагментом транспортного тунелю. Стрічка конвеєра моделюється плоскою прямокутною касетою на якій розміщується зразок у вигляді плоского шару частинок матеріалу, конструкція стенду має привід для переміщення касети через МХ камеру з заданою швидкістю, моделюючи таким чином рух транспортної стрічки. Дно касети виготовлено сітчастим для можливості продувки шару матеріалу потоком повітря,

для створення потоку повітря достатньої швидкості в тунелі, на виході МХ камери прорізано щілеподібний отвір, через який окремо встановлений вентилятор втягує повітря через шар матеріалу, що проходить над ним. Таким чином моделюється фільтраційна складова процесу вологовидалення після проходження касети з шаром матеріалу етапу нагрівання в МХ камері.

Загальний вигляд стенду та схема його будови приведено на рис. 1 та 2.

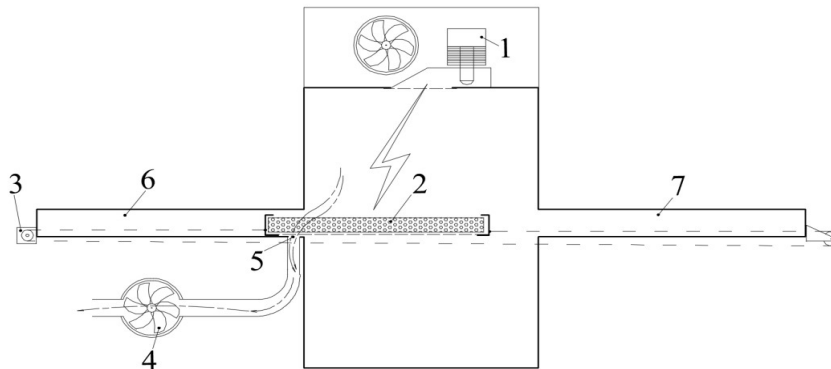


Рис. 2 – Схема дослідного стенду для експериментального моделювання процесу комбінованого сушіння

Основна ідея експерименту полягала в тому, щоб фізично змоделювати процес впливу МХ та фільтраційного способів сушіння на зразок матеріалу (вага, вологість, зовнішній вигляд, структура шару) розміщений на фрагменті транспортної стрічки конвеєра. Послідовно переміщаючи касету із зразком спочатку через МХ камеру а потім над вікном фільтраційного сушіння на зразок здійснювався вплив еквівалентний проходженню ним одного сушильного модуля сушарки. Далі касета із зразком зважувалась і фотографувалась для оцінки змін. Повторними циклами моделювався вплив наступних сушильних камер, дослід імітував роботу умовної дванадцятизонної сушарки, тому продовжувався відповідну кількість циклів або зупинявся при появі ознак термічного пошкодження матеріалу.

В якості МХ камери в стенді використано мікрохвильову піч з типовим для таких застосувань магнетроном Witol 2M217J потужністю 0,6 кВт, розміри касети (моделі фрагменту стрічки) склали 18 на 19 см., швидкість руху касети встановлювалась в діапазоні від 11 мм/с до 1,67 мм/с., продування шару матеріалу при фільтраційному етапі сушіння здійснювалось атмосферним повітрям при температурі 18-20 °С та вологості 55-60%. В якості матеріалу для сушіння обрано горох з початковою вологістю 35-36% виміряної вологоміром «Wille-66», боби гороху, з гладкою сферичною поверхнею розміщувались в межах касети щільним шаром в ~1,5 боба, маса зразка складала 200-220 гр. в різних дослідях. Процес досліджувався на п'яти різних швидкостях переміщення касети. Максимальна швидкість відповідала найбільш короткочасному впливу, тобто «м'якому» режиму обробки, найменша швидкість – відповідно найбільш «жорсткому» режиму обробки. Вимірювання ваги касети здійснювалось після кожного циклу обробки лабораторними вагами з роздільною здатністю 0,1 гр. та діапазоном вимірювання до 6000 гр.. Вимірювання температури поверхні шару матеріалу в касеті проводилось за допомогою інфрачервоного безконтактного термометра, що забезпечує роздільну здатність 0,1 °С.

Результати експериментів та їх обговорення.

В ході серії експериментів встановлено наступні залежності. Як і в попередніх дослідженнях, підтверджено, що кількість видаленої вологи прямо пропорційна тривалості впливу та має близьку до лінійної залежність від потужності МХ впливу. Графіки на рис. 3. ілюструють зростання кількості видаленої вологи в залежності від кількості проходів через сушильну камеру та зворотню залежність від швидкості стрічки (касети зі зразком), тобто пряму залежність від експозиції (тривалості) сушіння і відповідно від кількості підведеної до зразка енергії.

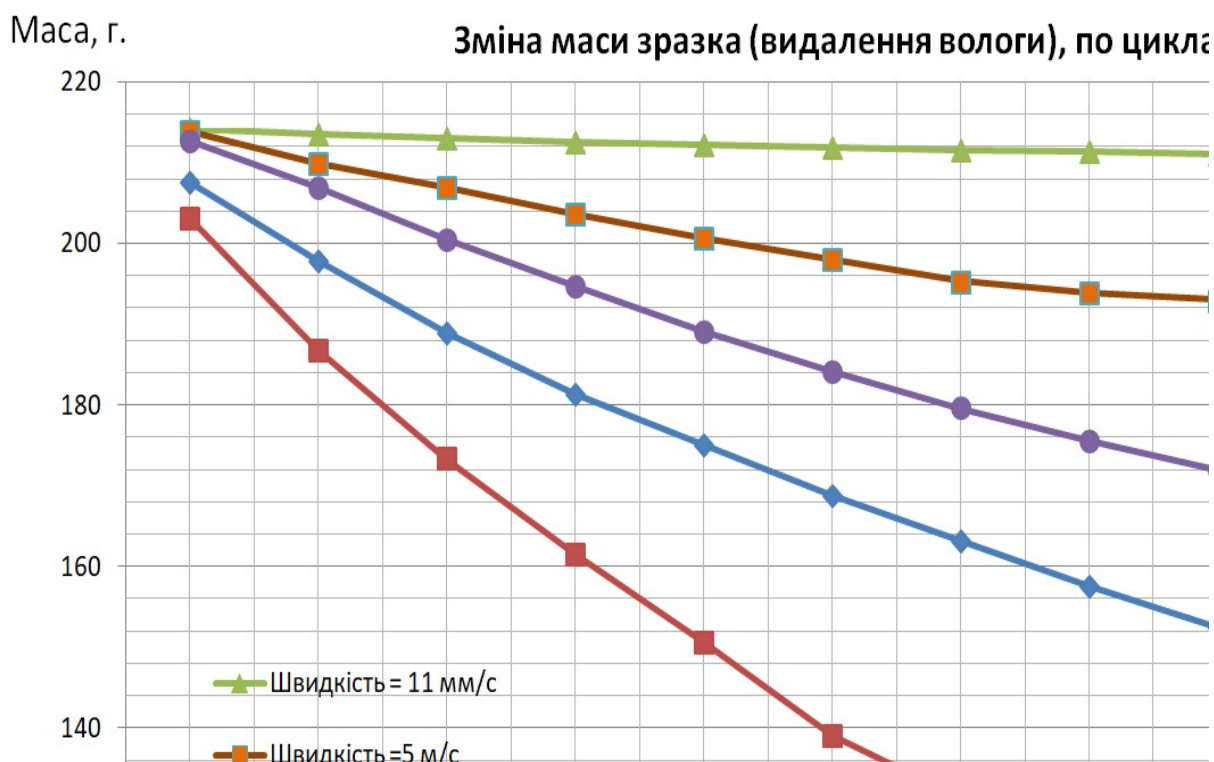


Рис. 3 – Графіки залежності кількості видаленої вологи від кількості циклів сушіння

Як і очікувалось, швидкість видалення вологи в перших циклах сушіння була високою і зменшувалась в наступних, відповідно до зменшення кількості вільної вологи в матеріалі.

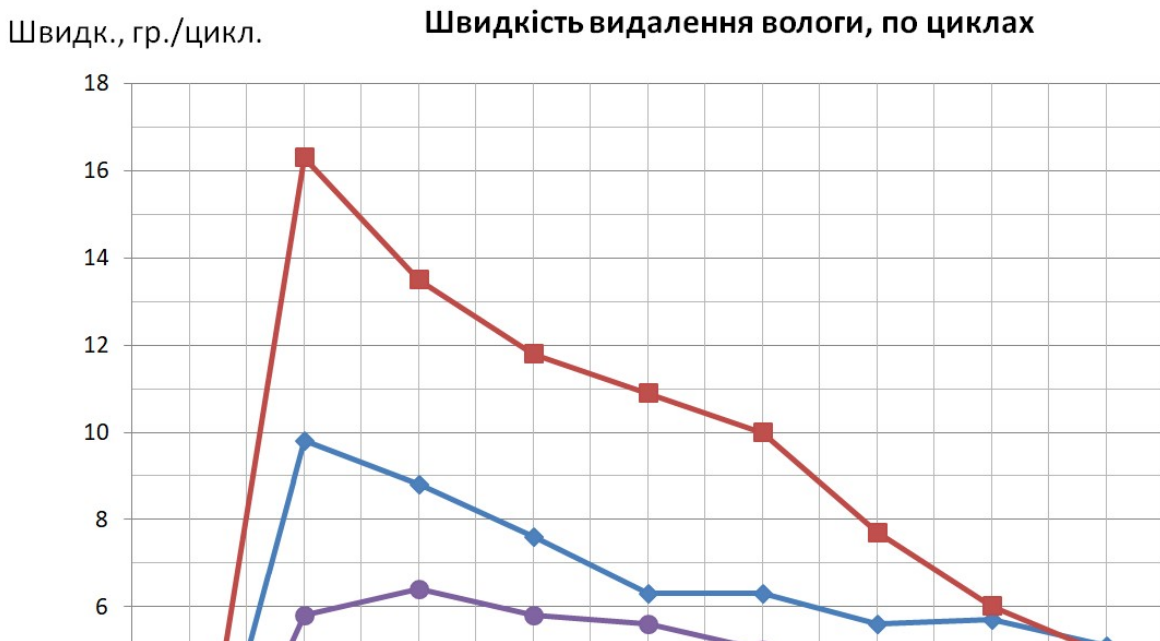


Рис. 4 – Графіки залежності швидкості видалення маси води з матеріалу в залежності від кількості циклів сушіння

Вимірювання температури поверхні шару матеріалу проводилось по закінченню кожного циклу, отримані лінії росту температур в залежності від кількості циклів обробки показано на рис. 5. Так як температура всередині частинок є вищою за температуру їх поверхні, для жорстких режимів сушіння вона досягатиме 100 °С і більше. Через складність технічної реалізації, вимірювання температури внутрішніх шарів частинок матеріалу не проводилось, візуальний контроль зовнішнього стану зразка дозволив встановити, що на швидкості 3 мм/с, на сьомому циклі обробки проявляється інтенсивне розтріскування зовнішньої оболонки бобів а на мінімальній дослідженій швидкості розтріскування проявляється вже на третьому циклі а на восьмому вже проявляються сліди обуглювання матеріалу.

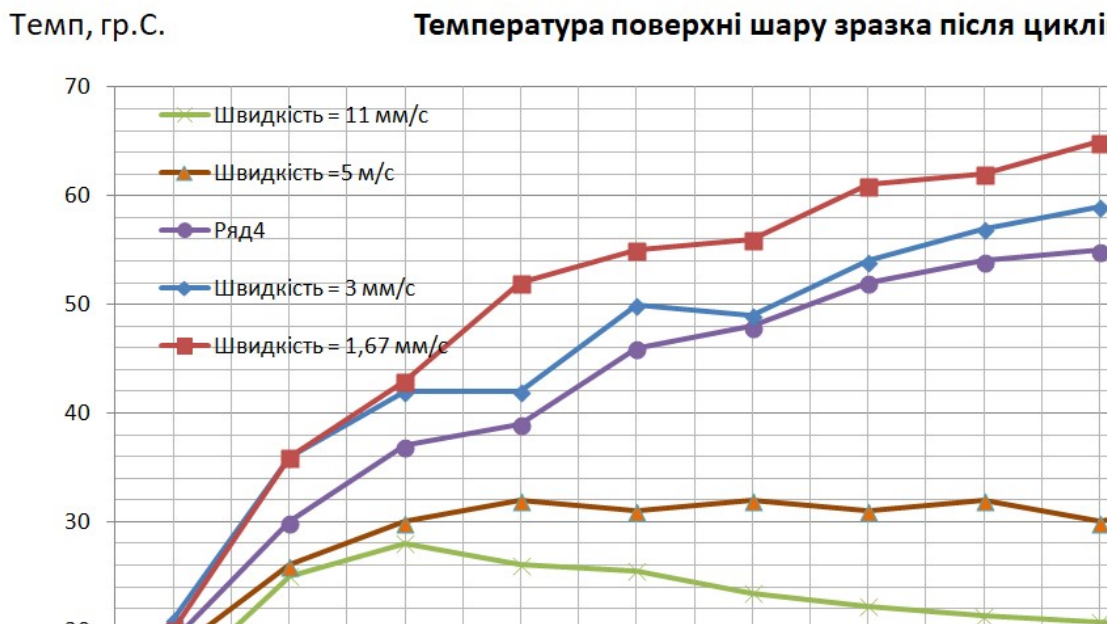


Рис. 5 – Графіки зміни температури поверхні зразка в залежності від кількості циклів сушіння

Зважаючи на те, що тривалість циклів сушіння є різною в залежності від швидкості стрічки (касети) досліджені залежності представлені також в часовому вимірі. На рис. 6 відображено залежність кількості видаленої води від тривалості обробки матеріалу. Для кожної швидкості (експозиції) сушіння зберігається пропорційна залежність як від тривалості процесу так і від підведеної потужності.

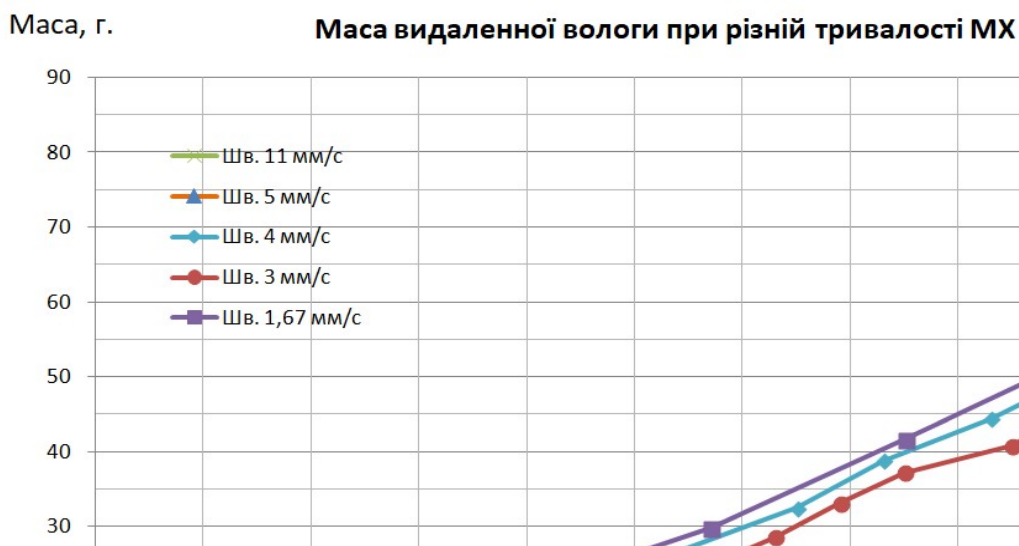


Рис. 6 – Залежності кількості видаленої зі зразка вологи від тривалості обробки

Швидкість видалення вологи зі зразка має найбільше значення на початку процесу обробки та досягає 4 %/хв. для жорстких режимів обробки, слід відмітити, що падіння швидкості вологовидалення відносно плавно і при завершенні процесу все ще складає близько 2 %/хв..

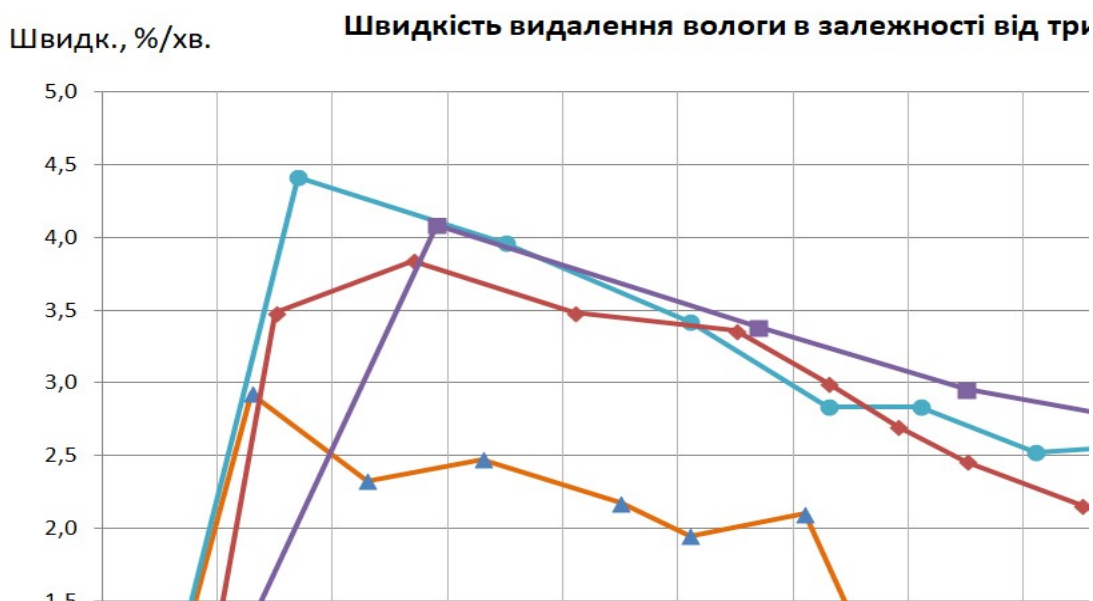


Рис. 7 – Залежності зміни швидкості видалення вологи від тривалості обробки

Питома потужність, що підводилась до зразка складала постійне значення (магнетрон працював у штатному режимі без переривань) і при початковій «netto» вазі матеріалу зразка 200-210 гр. складала 2,85 кВт/кг. вологого продукту.

Додатково до описаних вище дослідів проведено серію експериментів з дослідженням впливу тривалості фази фільтраційного сушіння на сумарний результат вологовидалення комбінованим способом. Для встановлення такої залежності фізично змінювались розміри прямокутного вікна (позначене як 5 на рис. 2) розташованого по всій ширині транспортного тунелю на виході МХ камери. Максимальна ширина вікна складає 20 мм., для уникнення витоків випромінювання простір вікна перекритий металевою сіткою. Ширина вікна в досліді змінювалась в межах 20, 15, 10 та 5 мм., швидкість потоку повітря при цьому регулювалась частковим перекриттям повітрянотруди таким чином, щоб потік повітря над вікном в тунелі залишався в межах 7-8 м/с. Інші параметри процесу (матеріал, потужність енергопідведення, швидкість переміщення касети) не змінювались. В результаті серії дослідів встановлено, що на середніх швидкостях (3, 4, 5 мм/с) тривалість етапу фільтраційного сушіння малозначимо впливає на результуючу кількість видаленої вологи, проте відсутність етапу продування шару матеріалу приводить до появи шару вологи на поверхні частинок після проходження зразком МХ камери.

Висновки та перспективи. За результатами проведеного дослідження визначено параметри доцільного режиму обробки для такої сировини як боби гороху. Виходячи з отриманих результатів можна запропонувати наступний комплекс характеристик для вибору або розробки стрічкової МХ сушарки з комбінованим способом сушіння для впровадження в технологічні процеси з таким рослинним матеріалом як горох. В якості типового режиму для розрахунку продуктивності та вибору конструктивних параметрів сушарки доцільно прийняти товщину шару гороху в 1-2 боби з початковим навантаженням стрічки близько 6 кг/м^2 . При типовій швидкості стрічки 4 мм/с та величині питомого енергопідведення $2,5 - 3 \text{ кВт/кг}$, при наявності 12 сушильних модулів, продуктивність сушарки з стрічкою шириною 1 м. складе близько 86 кг/год по вологому продукту, або 43 кг/год для більш раціональної за конструкцією сушарки з шириною стрічки $0,5 \text{ м}$. При зазначених параметрах процесу і конструктивних параметрах сушарки можливо розраховувати на типове зменшення вологості гороху на $\sim 3\%$ після проходу кожної з перших 6 сушильних камер і подальшого зниження вологості на $2,0 - 1,0\%$ після проходу кожної наступної сушильної МХ камери.

Очевидно, що такий експериментальний спосіб визначення параметрів доцільного режиму обробки цільового матеріалу та кількості циклів сушіння для досягнення бажаного, кінцевого значення вологості готового продукту є недосконалим. Проте альтернативний варіант з аналітичним моделюванням є априорі складно реалізуємим через велику кількість змінних факторів [16, 17].

Визначивши експериментально доцільну тривалість процесу, кількість сушильних модулів та розрававши можливі рівні продуктивності, провівши дослідження кінетики процесу в діапазоні допустимих швидкостей стрічки можливо визначити достатні параметри МХ обладнання: потужність сушильних модулів, діапазон регулювання швидкості стрічки та інтенсивність продувки шару матеріалу. При необхідності, також можливо, експериментально визначити доцільні розміри частинок (наприклад для різаних фруктів, овочів) та спосіб їх розміщення на стрічці. Далі орієнтуючись на необхідну питому потужність з розрахунку на вагу матеріалу, що одномоментно знаходиться в МХ камері, слід визначити загальну електричну споживану потужність МХ сушарки (або одного її модуля) необхідну для обробки цільового матеріалу з заданою продуктивністю та в межах заданих технологічних параметрів.

Подальшими кроками у проведенні дослідження можливостей комбінованого способу сушіння є розробка деталізованого варіанту конструкції МХ установки для сушіння гороху та схожих на нього за будовою і властивостями матеріалів.

References

1. Burdo, O. G. (2010). *Evolution of drying installations* [Monograph]. Odesa: Poligraf.
2. Burdo, O. G., Trishin, F. A., & Gavrillov, A. V. (2021). Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57(3), 330–340. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
3. Burdo, O. G., et al. (2016). Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems. *International Journal of Engineering Research and Application*, 6(3, Part 4), 144–150.
4. Alibaba.com. (n.d.). *Microwave drying machine*. <https://www.alibaba.com/showroom/microwave-drying-machine.html>
5. Kumar, C., & Karim, M. A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
6. Szadzińska, J., & Mierzwa, D. (2021). The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 167, 108532. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108532>
7. Kumar, C., Joardder, M. U. H., Farrell, T. W., & Karim, M. A. (2017). Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model. *Drying Technology*, 36(6), 736–750. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1354874>
8. Zhang, L., & Wang, W. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.ijfst.2020.110638>
9. Brown, M., et al. (2023). Recent developments in the hybridization of the freeze-drying technique in food dehydration. *Foods*, 12. <https://doi.org/10.3390/foods12183437>
10. Kotsur, I. (2024). Study of corn dehydration processes under combined electromagnetic and centrifugal fields. *Scientific Works*, 88(1), 84–89. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2965>
11. Yarovyi, I. I., & Ali, V. P. (2020). Initiation of mechano-diffusion moisture removal regime in plant material drying processes. In *Energy. Business. Comfort: Proceedings of the Scientific and Practical Conference* (pp. 12–77). Odesa: ONAFT. <https://www.onaft.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-EBC2020.pdf>
12. Burdo, O. G., Terziev, S. G., & Ruzhytska, N. V. (2013). Generalization of experimental studies of coffee sludge extraction. *Scientific Works of Odesa National Academy of Food Technologies*, 44(2), 334–337. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2013_44%282%29_82
13. Smith, J., & Johnson, M. (2019). Combined microwave vacuum drying. *Food Science and Technology International*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.foodsci.2019.110638>

14. An, N. N., Li, D., Wang, L. J., & Wang, Y. (2022). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: An updated understanding. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(9), 2618–2633. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
15. Burdo, O. G., et al. (2020). System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials. *Problemy Regionalnoy Energetiki*, 46(1), 92–104. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
16. Sharma, G. P., & Prasad, S. (2001). Mathematical modeling of microwave drying of beans (*Vicia faba* L.), peas (*Pisum sativum*), and tomatoes (*Rio grande*) in thin layer. *Journal of Food Engineering*, 48(3), 209–216. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00133-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00133-2)
17. Gavrilov, A., Bezbakh, I., Mordynskiy, V., & Burdo, O. (2018). Study of energy technologies of plant raw material dehydration processes. *Scientific Works*, 82(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1023>

EXPERIMENTAL MODELING OF THE KINETICS OF MOISTURE REMOVAL PROCESS IN MULTIZONE MICROWAVE BELT DRYERS

Yaroviy I.I., Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Kotsur I.O., Postgraduate Student,
Antseforov V. O., Master's Student
Odesa National Technological University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The relevance of drying processes for modern industry and the prospects of microwave drying and combined methods based on it are demonstrated.*

Examples of technologies for microwave processing of raw materials (with drying as the basic technology) implemented by foreign manufacturers are provided, and a generalized assessment of the most significant advantages of microwave processing of wet materials is presented. The rationale for choosing a modular design for a universal conveyor-belt microwave dryer with a wide range of processing modes for wet bulk materials of plant origin is given. The possibility of using an experimental method for parameterizing the drying process by simulating it in multi-zone conveyor-belt microwave installations is considered. This is done by modeling the drying process kinetics in a test bench with periodic processing of the raw material (wet material) in a microwave exposure chamber with a set number of iterations.

The possibility of intensifying the moisture removal process by initiating a mechano-diffusion moisture transfer regime at the initial drying stage was experimentally verified. The necessary conditions and limiting factors for the formation and repeatability of such a moisture removal regime in each subsequent iteration were determined. A justification for using this combination of moisture removal technologies and the impact of the mechano-diffusion effect and the filtration drying method on the final productivity of such a combined drying method is proposed.

The feasibility of implementing combined microwave drying paired with filtration drying was experimentally proven for one typical type of raw material (peas). It was established that for the investigated type of raw material, the efficiency of the combined drying method has typical dependencies: it is proportional to the duration and power of the microwave drying period and is less dependent on the duration of the filtration drying cycle.

The general principles of the design of a conveyor-belt, modular drying unit with a combined drying method for bulk plant raw materials are described. A design for an industrial prototype of a microwave conveyor-belt drying unit with a modular design and the possibility of implementing the combined drying method is proposed.

Keywords: microwave drying, combined drying, filtration drying, pea drying, mechano-diffusion.

Список використаної літератури

1. Бурдо, О. Г. Эволюция сушильных установок [Текст] : монография / Бурдо О. Г. - Одеса : Поліграф, 2010. - 368 с. : табл., рис. - Бібліогр.: 122 назв. - ISBN 978-966-8788-98-7.
2. Бурдо О. Г., Трішін Ф. А., Гаврилов А. В. та ін. Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57. No. 3. P. 330–340. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
3. O.G. Burdo. et.al. *Int. Journal of Engineering Research and Application* www.ijera.com ISSN : 2248-9622, Vol. 6, Issue 3, (Part -4) March 2016, pp.144-150
4. Microwave Drying Machine. <https://www.google.com/search?q=Alibaba.com> : сайт. URL: <https://www.alibaba.com/showroom/microwave-drying-machine.html> (дата звернення: 10.09.2025).
5. Kumar, C. and Karim, M. A. (2019) Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (3). pp. 379-394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
6. Szadzińska J., Mierzwa D. The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021. Volume 167. P. 108532. ISSN 0255-2701. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108532.
7. Kumar, C., Joardder, M. U. H., Farrell, T. W., & Karim, M. A. (2017). Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model. *Drying Technology*, 36(6), 736–750. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1354874>

8. Li Zhang, Wei Wang. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. DOI 10.1016/j.ijfst.2020.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
9. Michael Brown, et al. (2023). Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration. *Foods* (MDPI), 12. DOI 10.3390/foods12183437. [MDPI] <https://doi.org/10.3390/foods12183437>
10. Коцур, І. (2024). ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ВІДЦЕНТРОВИХ ПОЛІВ. *Scientific Works*, 88(1), 84-89. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2965>
11. Яровий І.І., Алі В.П., Ініціювання механо-дифузійного режиму видалення вологи в процесах сушіння рослинної сировини // *Енергія. Бізнес. Комфорт: матеріали науково-практичної конференції (26 листопада 2020р.)*. – Одеса : ОНАХТ, 2020. С. 12-77. - Режим доступу: <https://www.onaft.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-EBC2020.pdf>
12. Бурдо О. Г., Узагальнення експериментальних досліджень екстрагування шламу кави / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзієв, Н. В. Ружицька // *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*. - 2013. - Вип. 44(2). - С. 334-337. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2013_44%282%29_82
13. John Smith, Maria Johnson. (2019). Combined Microwave Vacuum Drying. *Food Science and Technology International*, 25. DOI 10.1016/j.foodsci.2019.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
14. An, N. nan, Li, D., Wang, L. jun, & Wang, Y. (2022). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(9), 2618–2633. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
15. System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials / Burdo O. G. et al. *Problemy Region. Energ.* 2020. Vol. 46, No. 1. P. 92–104. DOI: 10.5281/zenodo.3898317.
16. Sharma G. P., Prasad S. Mathematical Modeling of Microwave Drying of Beans (*Vicia faba* L.), Peas (*Pisum sativum*) and Tomatoes (*Rio grande*) in Thin Layer. *Journal of Food Engineering*. 2001. Vol. 48, No. 3. P. 209–216. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00133-2.
17. Гаврилов, А., Безбах, І., Мординський, В., & Бурдо, О. (2018). Дослідження енерготехнологій процесів зневоднення рослинної сировини. *Scientific Works*, 82(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1023>

Отримано в редакцію 11.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025
Approved 02.09.2025