

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Яровий І.І., к.т.н., доцент, Маренченко О.І., к.т.н., Алі В.П., аспірантка
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Сушіння є одним з найбільш енерговитратних процесів в харчовій та переробній промисловості. Вчені та інженери багатьох країн постійно працюють над вдосконаленням технологій сушіння проводячи пошук нових способів видалення вологи з сировини та харчової продукції. Для традиційного, конвективного способу сушіння розроблено та впроваджено велику кількість його варіацій. Проте обмеження конвективного сушіння пов'язані з фізикою процесів тепло і масопередачі не дозволяють розраховувати на суттєве збільшення енергоефективності та продуктивності конвективних технологій сушіння. Одним з конкурентів конвективного способу сушіння є мікрохвильове сушіння, яке використовує відмінні від конвективного способу принципи підведення теплової енергії до вологи, що міститься в матеріалі. Технології мікрохвильового сушіння поступово переходять з розряду інноваційних високотехнологічних способів вологовидалення до розряду спеціалізованих але доступних виробнику процесів. В роботі представлено узагальнений аналіз мікрохвильового способу сушіння вологих матеріалів та його основних переваг. Розглянуто розвиток мікрохвильового способу сушіння шляхом його комбінування з фільтраційним сушінням. Приведено переваги такого комбінованого способу сушіння. Приведено аналіз актуальних технічних та технологічних обмежень в дизайні мікрохвильового обладнання для сушіння рослинної сировини. Приведено перелік конструктивних та технологічних задач, які слід вирішити в процесі створення стрічкових мікрохвильових сушарок. Представлено короткий огляд типового для галузі технологічного обладнання для мікрохвильової обробки рослинної сировини та вологих матеріалів в цілому. Запропоновано модульну конструкцію мікрохвильової сушильної установки та описано її основні складові частини. Представлено узагальнені результати експериментального моделювання процесу видалення вологи в мікрохвильовій стрічковій сушарці. Надано висновки щодо перспектив впровадження технологій мікрохвильового сушіння в існуючі технологічні процеси харчової та переробної промисловості.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, комбіноване сушіння, бародифузія, конструкція мікрохвильових сушильних апаратів.

Постановка проблеми. Сушіння рослинної сировини є найдавнішим і найбільш поширеним, завдяки своїй простоті та доступності, способом консервування харчової сировини, зокрема для більшості видів сировини рослинного походження. Способів та методів реалізації сушіння та відповідно конструкцій сушильних апаратів винайдено багато, оскільки в кожному конкретному випадку при розробці технології сушіння та конструкції сушильного обладнання технологам і конструкторам доводилось вирішувати цілий комплекс задач пов'язаних з необхідністю досягнення цільових характеристик процесу сушіння конкретної сировини чи матеріалу.

Для видалення вологи з сировини рослинного походження, в більшості видів сушильного обладнання, використовується нагрівання цієї сировини (вологого матеріалу) до допустимих для матеріалу температур з метою ініціювання та інтенсифікації процесів випаровування (зміни агрегатного стану) вологи в матеріалі і подальшої евакуації утвореного водяного пару від поверхні матеріалу. Процес сушіння шляхом нагрівання вологого матеріалу реалізовано у великій кількості конструкцій сушильних апаратів [1], які відрізняються, в першу чергу, способами підведення та розподілу теплової енергії адаптованими до видів та станів вологих матеріалів. Інші способи сушіння (такі як механічне, сублімаційне чи акустичне), що не використовують нагрівання вологи в матеріалі для зміни її агрегатного стану, мають місце в процесах харчової галузі, проте їх загальна доля порівняно з технологіями теплового сушіння відносно невелика.

Найбільше варіантів використання та конструктивних реалізацій має конвективний спосіб сушіння, який використовує гаряче повітря в якості агента для передачі тепла вологому матеріалу та одночасного для віднесення від нього видаленої (випареної) вологи. Процеси сушіння з використанням конвективного теплообміну достатньо добре вивчені, описані та адаптовані під актуальні задачі галузі [2]. Добре відомі як переваги так і недоліки конвективних технологій сушіння. На сьогодні залишається проблемою віднайти інший спосіб енергопідведення який би так само легко адаптувався та масштабувався до різнопланових задач сушіння харчової сировини та продукції як конвективний. Проте для локальних задач невеликої продуктивності такі недоліки конвективних технологій сушіння як висока енергоємність, недостатні екологічність та енергоефективність, можуть бути достатньо суттєвими, щоб для такого сегменту ринку сушильних технологій вести активний пошук нових способів видалення вологи. Аналізуючи конкурентні до конвективного

способи вологовидалення, одним з перших слід розглянути мікрохвильове (МХ) сушіння [3] та комбіновані способи сушіння на його основі [4].

Метою роботи є проведення узагальненого аналізу технічних та технологічних задач які слід вирішити проектувальнику сушильного обладнання в разі прийняття рішення про розробку мікрохвильового апарату з заданими параметрами.

Аналіз результатів досліджень. Провідні експерти вважають [5,6,7], що саме мікрохвильове сушіння та комбіновані способи на його основі, мають всі шанси відвоювати значну частину ринку сушильних технологій запропонувавши такі переваги МХ сушіння як значне збільшення продуктивності процесу, покращення якості висушеного продукту внаслідок більш повного збереження його первинних вигляду, структури та біохімічного складу, збільшення однорідності висушених партій продукту. Слід враховувати також супутні переваги та можливості МХ сушіння: можливість стерилізації матеріалу який висушується, високу точність та простоту керування процесом, екологічність процесу та відсутність «карбонowego сліду», компактність та механічна простота (легкість інтеграції) сушильного обладнання, можливість його масштабування. Кожен з вищезазначених факторів може проявлятися (використовуватись) в конкретній реалізації процесу сушіння різною мірою, в залежності від цілей розробників сушильного МХ обладнання та режимів на які буде розраховано конструкцію МХ сушарки. Проте основні переваги (продуктивність, якість та рівномірність характеристик готового продукту, екологічність) буде притаманна усім варіантам конструктивних реалізацій процесу МХ сушіння.

В основі **мікрохвильового способу** сушіння вологих матеріалів лежить фізичний ефект безпосереднього впливу електромагнітного поля високої частоти на вологу, що міститься в матеріалі, який піддається обробці. Тепловий ефект від такої взаємодії визначається ступенем поглинання енергії надвисокочастотного (мікрохвильового) випромінювання вологими шарами матеріалу. Для матеріалів рослинного походження, ступінь поглинання ними енергії випромінювання визначається рядом характеристик, але основними є кількість води, що міститься в матеріалі та діелектричні властивості самого матеріалу. Внаслідок інтенсивного зовнішнього впливу електромагнітного МХ поля молекули води, які є диполями, та інші іонізовані частинки в матеріалі змінюють свою фізичну орієнтованість з довільної на задану лініями зовнішнього електромагнітного поля. Результатом такого обертального (тремтячого) руху молекул, є виділення тепла, що і приводить до розігріву вологих шарів матеріалу. Потужність, що виділяється в даному процесі можна розрахувати за формулою

$$N \approx E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \sigma \quad (1)$$

де, E – напруженість електромагнітного поля в матеріалі; f – частота поля;

ε – діелектрична стала матеріалу; σ – кут діелектричних втрат в матеріалі.

Відповідно до залежності (1) величина виділеної потужності залежатиме від напруженості та частоти електромагнітного поля і характеристик самого вологого матеріалу, які до речі змінюються по мірі зменшення в ньому кількості води. Можливість використання в процесах сушіння генераторів електромагнітного поля (магнетронів) з різними частотами генеруемого випромінювання обмежені законодавством про розподіл частотного діапазону між системами зв'язку. Практично доступним є діапазон 2450 МГц в якому і працюють більшість магнетронів побутового та промислового призначення. Окрім того із збільшенням частоти генеруемого поля зменшується його проникність в глибину матеріалу, яка для більшості біологічних (рослинних) матеріалів є невеликою і складає від декількох міліметрів до декількох сантиметрів, в залежності від типу матеріалу та його поточного стану (ε і σ не є сталими і залежать від температури та кількості води в матеріалі).

Найбільш суттєвим параметром, що визначає потужність генерування теплового потоку у вологому матеріалі є напруженість електромагнітного поля, яка визначається і обмежуються технічними характеристиками генераторів МХ поля – магнетронів, режимом роботи яких можливо керувати простим вмиканням та вимиканням генерації.

Буде невірним стверджувати, що потужність (напруженість) МХ поля є єдиним важливим параметром, що визначає роботу мікрохвильових систем (сушіння, нагрівання, стерилізації). В залежності від технологічного завдання, конструктивна реалізація (а рівно і режим роботи) МХ установки можуть бути різними: періодичної чи безперервної дії, одно чи багатокамерною, з сушінням в тонкому шарі або при частковому заповненні сушильних камер. Вимоги та обмеження технологічного завдання приводять до конкретних конструктивних рішень, які в свою чергу впливають на ефективність процесу енергопідведення та цільові параметри технологічного процесу.

Таким чином **для конкретної технологічної задачі** та заданого типу вологого матеріалу, цілком можливо розглянути перспективу впровадження технології сушіння в системах з мікрохвильовим енергопідведенням за умови відповідності майбутнього процесу декільком початковим умовам: очікувана продуктивність установки (обмежується в основному конструктивними характеристиками наявних на ринку магнетронів), може складати, в залежності від типу обробляемого матеріалу, в діапазоні від десятків до сотень кг/год.; процес обробки можливий як поточний так і «порційний»; величина шару частинок вологого матеріалу в зоні МХ сушіння складатиме 15-50 мм. (в залежності від характеристик матеріалу); підприємство во-

лодіє достатніми ресурсами для експлуатації високотехнологічного обладнання. Технологічні вимоги та обмеження мають бути деталізовані в залежності від характеристик цільової вологої сировини (матеріалу, що оброблятиметься).

Основні переваги мікрохвильового сушіння витікають зі способу взаємодії МХ електромагнітного поля з вологою в матеріалі [8]. Генеруючи тепловий потік безпосередньо у вологих шарах матеріалу, МХ випромінювання електромагнітного поля мало впливає на сухі (вже висушені) області матеріалу, тобто тепловий вплив електромагнітного поля буде цільовим (адресним), направленим на вологі осередки чи шари в матеріалі який обробляється і буде зменшуватись та перерозподілятися між ними по мірі висушування матеріалу.

Такий спосіб нагрівання суттєво відрізняє мікрохвильовий нагрів від конвективного, в якому для нагрівання вологи матеріалу слід розігріти до цільової температури увесь об'єм матеріалу разом з вологою в ньому. Особлива кінетика процесу МХ сушіння визначає його високу енергоефективність, селективність та здатність до вирівнювання вологості в матеріалі. Ті ж причини визначають вищу, порівняно з конвективним, ефективність МХ сушіння для матеріалів з середньою та малою вологістю, так як із збільшенням вологості (~60% і вище) вищезазначені переваги МХ сушіння пропорційно зменшуються. Також слід враховувати те, що в разі нерегульованої, постійної обробки МХ полем, внаслідок зменшення кількості вологи в матеріалі, буде нелінійно зростати співвідношення кількості підведеної енергії та залишку вологи в матеріалі, що це випромінювання сприймає. Наслідком такого режиму енергопідведення буде швидкий локальний перегрів в окремих областях об'єму матеріалу. Як правило такі області перегріву важко контролювати, вони визначаються наявністю в сушильних камерах зон з підвищеною щільністю електромагнітного поля, розташування, величина та кількість яких визначаються конструктивними особливостями камер нагріву та поточними характеристиками вологого матеріалу в камері, тобто їх конфігурація може змінюватись в ході процесу МХ сушіння. Основним та найпростішим шляхом вирішення даної проблеми є рух матеріалу в камері МХ нагріву, в такому випадку кожна точка об'єму вологого матеріалу не буде стаціонарною відносно МХ впливу, а загальний вплив МХ поля буде інтегральним та достатньо рівномірним. Регулювання потужності підведеного до вологого матеріалу МХ поля здійснюють, як правило, за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), тобто простим регулюванням тривалості періодичного ввімкнення магнетрона.

Під дією електромагнітного МХ поля вологі області шару чи об'єму матеріалу будуть інтенсивно розігріватись а тиск в капілярах та міжклітинному просторі частинок рости. В результаті такого впливу на вологу, в шарах частинок матеріалу утворюються градієнти температури та тиску направлені від більш вологих внутрішніх шарів частинок матеріалу до їх зовнішньої поверхні. Співнаправлений вплив цих рушійних сил і є основним процесом який забезпечує високу продуктивність видалення вологи в установках МХ сушіння. На поверхню частинок волога матеріалу витискається з внутрішніх шарів (просочується) у рідкому стані і частково у вигляді пару (співвідношення залежить від інтенсивності нагріву), звідки продовжує випаровуватись у пришаровий простір під впливом вже інших рушійних сил: різниці температур та парціальних тисків над поверхнею шару та в повітряному просторі сушильної камери. Комплекс тепло та масообмінних процесів, що виникають при цьому складно описати аналітично на рівні узагальненої математичної моделі [9], з цієї причини основним способом дослідження процесів МХ сушіння все ще залишається експериментальний.

Одним з **перспективних режимів** видалення вологи при МХ сушінні рослинної сировини є «механодифузійний» [10]. Такий режим видалення вологи може бути ініційований і залишатись сталим в поточних процесах при обробці рослинної сировини з розвинутою капілярно пористою будовою та за умови достатньої кількості вільної вологи в капілярах матеріалу. Суть явища механодифузії полягає в тому, щоб шляхом інтенсивного впливу МХ полем нагріти вільну вологу матеріалу (таку, що знаходиться в капілярах та порах частинок матеріалу і слабо зв'язана з структурою матеріалу) до появи в капілярах бульбашок випареної вологи. Поява парових бульбашок в капілярах приводить до різкого посилення градієнту тиску вздовж капіляру і тим самим ініціює механічний рух вологи в капілярах в напрямі їх відкритої сторони, як правило до поверхні частинок. Ініціювання та утримання механодифузійного режиму видалення вологи з матеріалу є достатньо складною технологічною задачею, проте при її вирішенні та реалізації в промислових установках стає можливим досягнення високоенергоефективних режимів сушіння, як наслідку того, що значна частина вологи з матеріалу буде видалятись не у вигляді пару, а в стані рідини, тобто без зміни агрегатного стану вологи і без відповідних витрат енергії на таке перетворення.

Режим механодифузійного видалення вологи з рослинного матеріалу найбільш ефективно використовувати на першому етапі сушіння, в подальшому, коли кількість вільної вологи в матеріалі зменшиться, механодифузійний ефект мінімізується і видалення вологи проходитиме тільки у вигляді випареної вологи.

Як наслідок високої продуктивності процесу масопередачі вологи між внутрішніми шарами частинок матеріалу та їх поверхнею, при умовах близьких до режиму механодифузійного вологовидалення, швидкість перенесення вологи між центром та поверхнею частинок перевищує швидкість випаровування вологи з поверхні. За умови стабільного бародифузійного процесу, такий дисбаланс погіршує умови протікання процесу видалення вологи та призводить до збільшення його тривалості і зменшує енергоефективність МХ сушіння. Запобігти проблемі, збільшити продуктивність та енергоефективність МХ сушіння можливо шляхом поєднання (комбінування) МХ способу сушіння з іншими способами [4].

Основним завданням більшості комбінованих з МХ способів сушіння є створення додаткових рушійних сил для збільшення потоку відведеної від поверхні частинок матеріалу вологи. МХ нагрівання при цьому виступає основним «драйвером» процесу масоперенесення вологи у внутрішніх шарах частинок а комбінований з ним додатковий процес дозволяє збільшити потік вологи, що відводиться від поверхні частинок в атмосферу. За таким принципом працюють декілька основних комбінацій: МХ + інфрачервоне сушіння, МХ + конвективне сушіння, МХ + фільтраційне сушіння, та інші. Кожна з комбінацій має свої переваги та недоліки, так перші два способи виділяються тим, що використовують додатковий потік енергії у вигляді інфрачервоного випромінювання або нагрітого повітря. У обох випадках додатковий нагрів поверхні матеріалу збільшує потік випареної з поверхні частинок матеріалу вологи, проте суттєве збільшення загальної кількості енергії, що використовується для сушіння матеріалу значно погіршує енергетичний баланс такого способу. Комбінація МХ та фільтраційного сушіння передбачає переважно механічне «здування» вільної (витиснутої) вологи з поверхні частинок матеріалу, атмосферним повітрям (без додаткового нагрівання). При такому способі сушіння загальний енергетичний баланс процесу змінюється не критично, так як питомі витрати енергії на короткочасне продування шару матеріалу потоком повітря не є суттєвими [11]. Цілком очевидно, що найбільш ефективним такий спосіб сушіння буде в поєднанні з механо дифузійним режимом вологвидалення (перший період сушіння), в подальшому, через зменшення кількості вільної вологи на поверхні частинок, ефективність фільтраційної складової даного способу буде зменшуватись.

Таким чином, виходячи з переваг та обмежень мікрохвильового способу сушіння, при прийнятті основних композиційних рішень з дизайну мікрохвильових сушильних апаратів для обробки рослинної сировини, доцільно враховувати наступне:

- обробку (сушіння) вологого матеріалу слід проводити в тонкому шарі величина якого буде визначатись діелектричними характеристиками (глибиною проникнення МХ поля) для цільового матеріалу та на конкретному етапі сушіння (по мірі зменшення вологості матеріалу товщину шару доцільно збільшувати);
- при розрахунку показників продуктивності сушильної установки слід враховувати, що плоский рухомий шар, який оброблятиметься МХ полем буде обмежений розмірами сушильної МХ камери, потужністю МХ поля та тривалістю знаходження частинок шару матеріалу в межах дії МХ поля сушильної камери;
- основні параметри функціонування робочих зон (МХ камер) сушарки будуть суттєво змінюватись в залежності від вхідних параметрів матеріалу, що обробляється та в процесі сушіння, на жорстких режимах обробки можливе стрімке розвинення локальних перегрівів аж до пошкодження матеріалу;
- мікрохвильові апарати є багатофункціональним обладнанням і можуть також використовуватись для знезараження або стерилізації матеріалів і навіть для додаткової обробки готової продукції (в т.ч. запакованої) з метою збільшення терміну придатності.

Мікрохвильове сушіння та конструктивні обмеження способу. До недоліків мікрохвильових апаратів можна віднести декілька технічних особливостей пов'язаних з процесом генерації електромагнітного поля, і відповідно характерних для МХ способів сушіння.

Першим можна вважати відносно низький коефіцієнт перетворення електричної енергії в енергію електромагнітного МХ випромінювання, який (усереднено) складає 0,4-0,8 в залежності від конкретної моделі генератора мікрохвильового електромагнітного випромінювання – приладу під назвою «магнетрон». Так для поширених в побутових МХ печах магнетронів цей показник складає близько 0,6, тобто для магнетрона з потужністю генерації 0,9 кВт до 0,6 кВт спожитої електричної енергії, в процесі її перетворення в електромагнітне поле, витрачається на нагрівання самого приладу та на супутні втрати.

Так як магнетрони використовують в різних галузях техніки, є обґрунтовані сподівання [12], що прогрес в галузі пристроїв генерації електромагнітного поля надвисокої частоти дозволить використовувати в майбутніх мікрохвильових апаратах більш ефективні генератори МХ поля. Проте, на сьогодні, використання магнетронів з частотою генерації 2450 МГц є найбільш доцільним конструктивним рішенням для створення мікрохвильового сушильного обладнання.

Окрім відносно невисокого коефіцієнту перетворення енергії слід зважати на обмеження в потужності магнетронів. Для генераторів «побутового» класу, що використовуються в мікрохвильових печах, цей параметр становить 0,7-1,0 кВт, що в більшості випадків буде недостатнім для промислового використання, навіть за умови створення генеруючих масивів. Для промислового використання більш доцільне використання магнетронів з потужністю 2,0-3,0 кВт. Такі прилади представлені на ринку [13], проте їх вартість може складати до 800 USD за один прилад (без блоку живлення та іншої оснастки), що в рази перевищує питому вартість магнетронів «побутового» класу. Слід зазначити, що таке ціноутворення визначається як кращими характеристиками магнетронів промислового рівня, так і особливостями їх конструкції (водяне охолодження, допустимі режими використання, тощо).

Ще одним параметром, який слід враховувати при розробці МХ обладнання є обмежений ресурс мікрохвильових генераторів, що складає для більшості зразків від 2000 до 6000 годин роботи. Таке обмеження переводить магнетрони, як конструктивну складову мікрохвильової сушарки, до переліку «витратних компонентів», що зважаючи на їх вартість та складність контролю використаного ресурсу (різні режими генерації, умови роботи, тощо), суттєво впливатиме на вартість експлуатаційних витрат МХ обладнання.

Конструктивним обмеженням в дизайні конструкцій МХ сушарок є розміри сушильної камери. Для створення рівномірної (наскільки це можливо) напруженості електромагнітного поля в сушильній камері такі її характеристики як геометричні розміри, тип внутрішньої поверхні, розміщення входу хвилеводу магнетрона відносно об'єкту нагріву, слід обирати відповідними до параметрів як генераторів так і об'єкту сушіння. Для магнетронів з частотою випромінювання 2450 МГц довжина електромагнітної хвилі складає 12,24 см, тому для забезпечення рівномірності поля в обсязі камери та менших втрат внаслідок перевідбиття хвиль, внутрішні розміри сушильної (резонансної) камери слід обирати кратними цій довжині. З тих же міркувань обираються точки встановлення магнетронів, відносно шару вологого матеріалу та площини розміщення шару матеріалу в камері. Для зменшення втрат потужності випромінювання при перевідбитті хвиль, внутрішні поверхні камери мають бути рівними та полірованими. Для вирішення подібних задач доцільно скористатись спеціальним програмним забезпеченням на зразок CST Microwave Studio [14].

Виходячи зі згаданих вище конструктивних особливостей та обмежень МХ способів сушіння, при виборі загального дизайну сушильного апарату, окрім вирішення основної технологічної задачі, продиктованої характеристиками сировини та готового продукту, доцільно розглянути наступні рекомендації:

- мікрохвильову сушарку доцільно розглядати як багатокамерну, модульну установку стрічкового типу, в якій число резонаторних (сушильних) камер обирають виходячи з розрахункової продуктивності та характеристик самих сушильних камер;
- параметрами, що визначають продуктивність МХ сушарки за конкретним типом рослинної сировини є продуктивність транспортної системи та встановлена потужність випромінювання генераторів МХ поля всіх сушильних камер;
- зважаючи на необхідність «пом'якшення» режиму обробки (зменшення потужності поля) в ході процесу сушіння, доцільно розглядати кожен модуль сушарки як окрему ланку, режим роботи якої (швидкість руху шару матеріалу, потужність нагріву МХ полем, характер продування шару повітрям) визначатимуться та регулюватимуться індивідуально, відповідно до обраної програми обробки;
- конструкцію модулів сушильних камер доцільно оптимізувати до типових блоків, що монтуються в єдину конструкцію через фланцеві з'єднання і мають власний програмний керуючий модуль, який шляхом конфігурування керуючих сигналів інтегрується в програму керування процесом;
- конструкція сушильних модулів має дозволяти проводити оперативну заміну генераторів (магнетронів) з мінімальною витратою часу та, по можливості, без наступного налагодження.

Обладнання для мікрохвильової обробки матеріалів. Ринок мікрохвильового обладнання для сушіння та обробки рослинної сировини активно росте за рахунок азійських, в основному китайських, виробників. Кількість пропозицій на відомому сайті онлайн торгівлі за запитом «microwave tunnel drying machines» легко перевищує дві сотні позицій, більша частина яких відповідає розглянутим в попередніх розділах критеріям. В якості прикладу можна привести вироби компаній, що спеціалізуються на виготовленні та супроводі мікрохвильового обладнання [15].



Рис. 1 – Установка для сушіння харчових продуктів MiD-80

Обладнання для сушіння харчових продуктів виробництва Zhengzhou Dingli призначене для нагрівання, сушіння, випікання та стерилізації різних харчових продуктів у невеликих упаковках, продуктів у пляшках,

тістечок, печива, консервованих фруктів, соєвих продуктів, готової їжі, приправ, борошна, тощо. Також можна використовувати для сушіння морепродуктів (ламінарія, морська капуста, запікання креветок).

Лінійка обладнання включає тунельні МХ установки зі споживаємою електричною потужністю від 20 до 80 кВт. Установки побудовані на основі стрічкового приводу з кількома зонами сушіння, розміри (ШхВ) модулів установки 1.4х1.7 м та довжиною від 8.2 до 14.8 м. в залежності від кількості сушильних камер. Продуктивність установок лінійки декларується в межах від 150-200 до 500-600 кг./години. Матеріал виготовлення – нержавіюча сталь.

Установку для сушіння харчових продуктів MiD-80 показано на рис. 1. Можна вважати типовою за конструктивним виконанням для мікрохвильових апаратів подібного класу. Для таких апаратів є характерною компоновка у вигляді послідовності резонаторних камер, через які за допомогою стрічкового приводу переміщається потік матеріалу у вигляді плоского шару. Режим обробки визначається швидкістю транспортування потоку (експозицією обробки) та встановленим рівнем інтенсивності обробки матеріалу в кожній з камер. Зважаючи на кількість конструкцій створених різними виробниками за аналогічним дизайном, його можна вважати оптимальним для потокової обробки сипких матеріалів а також (враховуючи обмеження по висоті транспортного тунелю) для деяких видів штучних та попередньо упакованих продуктів.

Модульна конструкція мікрохвильової стрічкової сушильної установки. Модульний принцип в конструкції мікрохвильової сушильної установки розглядався авторами в роботах [16, 17], такий підхід до конструкції МХ сушарки дозволить вирішити питання адаптації її характеристик до конкретних технологічних вимог, шляхом нарощування кількості сушильних модулів установки. Зважаючи на високу вартість самих генераторів мікрохвильового випромінювання доцільно передбачити можливість вибору з декількох типів модулів з різною потужністю (кількістю) встановлених в модулі магнетронів. Загальний вигляд сушильного модуля приведено на рис. 2. Модуль складається з прямокутної резонаторної (сушильної) камери, габарити якої обирають відповідно до призначення установки, наприклад (г/ш/в): 570х520х580.

Зі сторін входу та виходу транспортної стрічки в резонаторній камері вбудовано фланці для з'єднання камери з транспортними тунелями або іншою камерою. Висота вікна має відповідати типу (висоті шару) сировини, що обробляється. Збільшення висоти тунелю надасть можливість обробляти більш габаритні ніж тонкий шар сипучої сировини матеріали, наприклад - стерилізувати упаковані продукти. Мінімальна висота вікна може становити 30...40 мм, максимальна визначається вимогами безпеки для персоналу та можливостями вхідного та вихідного шлюзів установки. Внутрішній простір камери – рівна, гладка поверхня, матеріал камери – нержавіюча сталь. У верхній частині камери знаходяться один або два магнетрони, їх хвилеводи спрямовані по нормалі до стрічки конвеєра. Для мінімізації взаємного впливу магнетронів вони взаємно орієнтовані під кутом 90°. Для реалізації комбінованого (МХ + фільтраційного) режиму сушіння в нижній площині камери виконано перфорацію у вигляді масиву отворів діаметром 2-3 мм до якого приєднується вхідний дифузор витяжної аспіраційної системи установки.

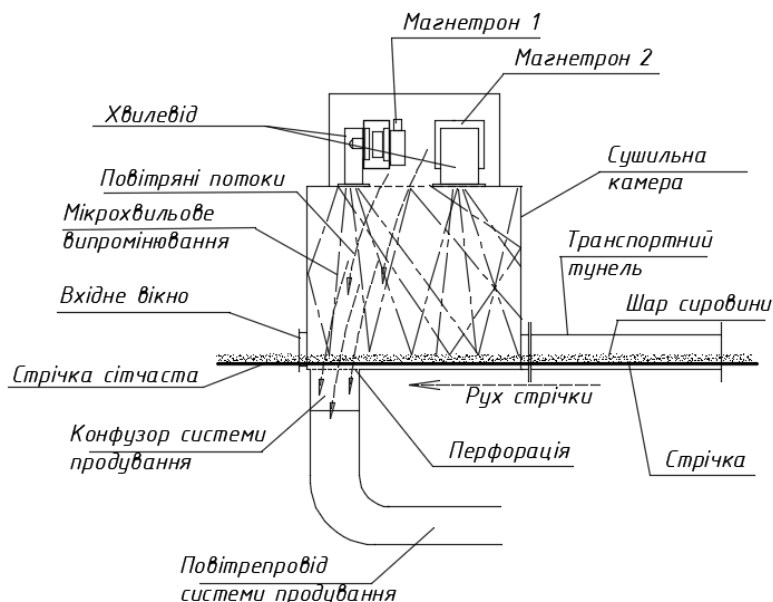


Рис. 2 – Загальний вид сушильного модуля (вид збоку)

Загальний вид мікрохвильової модульної стрічкової сушильної установки для сипучої рослинної сировини приведено на рис. 3.

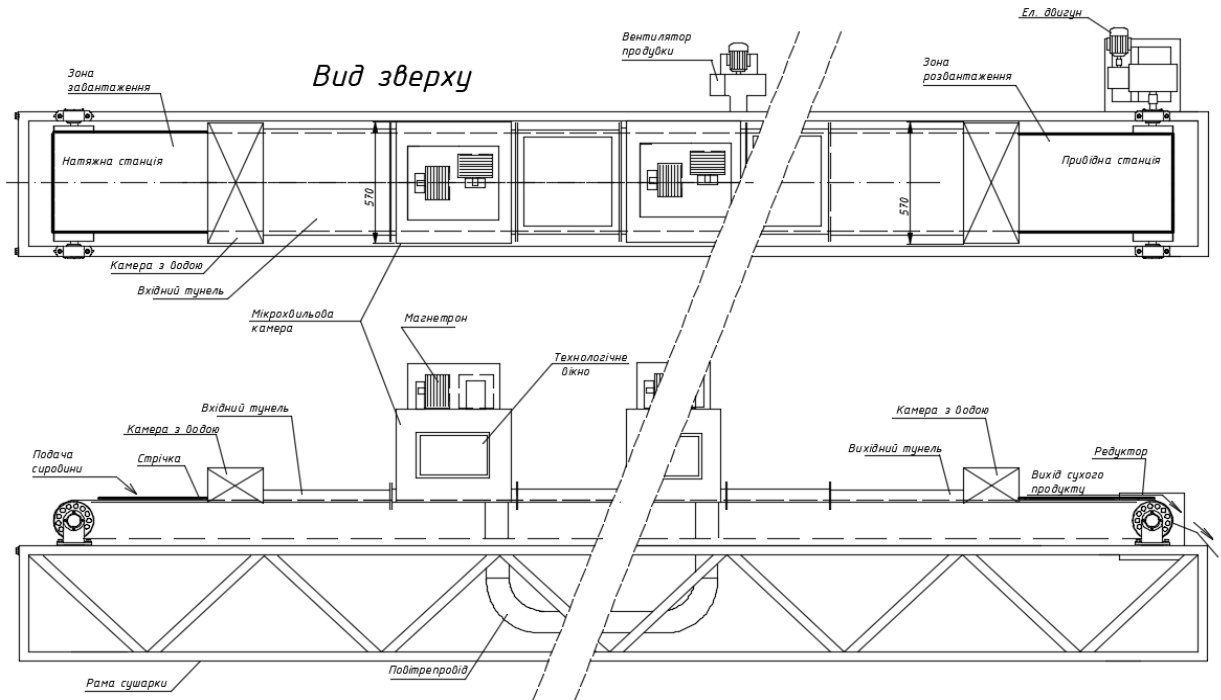


Рис. 3 – Загальний вид модульної мікрохвильової стрічкової сушильної установки

Конструкція модульної стрічкової сушарки передбачає розміщення на зварній рамі заданої кількості типових сушильних модулів, з'єднаних транспортними тунелями та доповнених входними шлюзами у вигляді водяних затворів – пластикових ємностей з водою, призначених для мінімізації випромінювання з камер сушарки. На кінцях опорної рами встановлено натяжну та привідну станції стрічкового приводу сушарки. Конфузори фільтраційної частини сушильних камер об'єднані в одну аспіраційну мережу, швидкість потоку повітря в кожній камері встановлюється окремо, регулюванням ширини фільтраційної зони в нижній площині камери. Для реалізації комбінованого способу сушіння має використовуватись перфорована або сітчаста стрічка, розмір комірок перфорації якої обирається пропорційно меншим до розміру частинок матеріалу, що обробляється.

Висновки. Основним параметром проектуемого сушильного апарату, як правило, є його продуктивність, визначена в одиницях обробленої у цільовому режимі вологої сировини – базовий параметр, що визначає рамки для більшості залежних від нього характеристик проектуемого апарату. Слідуючи конструктивним обмеженням мікрохвильового способу сушіння та завдяки відносній технічній простоті конструкції мікрохвильової сушильної установки можливо розробити та виготовляти мікрохвильове сушильне обладнання з широким спектром призначення, варіюючи лише окремі його параметри. А використання модульного принципу будови таких апаратів дозволить створювати мікрохвильові сушильні установки у великому спектрі продуктивності шляхом вибору відповідної кількості та потужності МХ сушильних модулів. Варіювання швидкості транспортної стрічки зробить можливим оперативне керування інтенсивністю обробки матеріалу а вибір габаритних розмірів транспортного тунелю установки дозволить адаптувати установку до розмірів шару матеріалу або висоти деталей чи упаковки продукції.

З огляду на складність аналітичного моделювання процесів, що визначають інтенсивність масопереносу на всіх етапах вологовидалення в МХ апаратах та враховуючи універсальність їх конструкції і широкий діапазон можливих режимів обробки сировини, можливо найкоротшим шляхом до впровадження МХ технологій в реальні процеси є експериментальне дослідження режимів МХ сушіння тестових зразків цільового матеріалу в дослідних сушильних установках. І в разі отримання позитивних результатів, побудова (придбання) установки, що має достатню установлену потужність випромінювачів та прийнятні для конкретного користувача капітальні та експлуатаційні витрати.

References

1. Merko I. T. (2001). *Scientific foundations and technology of grain processing*, Odesa.
2. Stankevich, H. M., Strakhova T. V., Borta A. V. (2021). *Grain drying: a textbook*, Odesa: KP UMD.
3. Shutuyuk, V. V. (2015). The use of microwave radiation for drying food products *Scientific works of the National Technical University of Ukraine*, 21(3), 133-140.
4. Bezbakh, I., Yarovy, I., & Voitenko, O. (2019). Combined methods of energy supply in the processes of drying plant raw materials. *Scientific Works*, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>
5. Burdo, O. G. (2010). *Evolution of drying plants* Odessa: Polygraph.

6. Guzik, P., Kulawik, P., Zając, M., & Migdał, W. (2021). Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(29), 7989–8008. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871>
7. Luis González-Cavieses, Mario Pérez-Won, Gipsy Tabilo-Munizaga, Erick Jara-Quijada, Rodrigo Díaz-Álvarez, Roberto Lemus-Mondaca (2021). Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products, *Trends in Food Science & Technology*, 116, 626-638, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005>.
8. Yarovy I. I., Kashkano M. A., Marenchenko O. I., Pylypenko Ye. O. (2019). Innovative methods of energy supply in the drying processes of heat-labile raw materials. *Innovative energy technologies -: coll. Ave. VII International science and practice Conference, Odesa, September 9–13.*, 17–23
9. Burdo O. G., Marenchenko E. I., Pylypenko E. A., Balagura V. M. (2017). Mathematical model of a microwave belt dryer *Innovative energy technologies: coll. Ave. VI International science and practice conference, Odesa, September 4-8.*, 381–389.
10. Burdo O. G., Alkhuri Y., Syrotyuk I. V., et al. (2018). The use of the mechano-diffusion effect in the production of concentrated polyextracts *Food science and technology*, 12(3), 97-108.
11. Atamanyuk V.M., Humnytskyi Y.M. (2013). *Scientific basis of filtration drying of dispersed materials*: monograph, Lviv: Publishing House - Lviv Polytechnic.
12. Description of solid-state microwave generators [Electronic resource] Solid State Generator - Fricke und Mallah
13. Characteristics of industrial microwave generators 2M290 [Electronic resource] 2M290 Original LG water cooled 3000w industrial microwave magnetron
14. Manufacturer of software for modeling microwave devices [Electronic resource] www.cst.com
15. Microwave Equipment Manufacturers [Electronic Resource] <https://www.joyangmachine.com> Shandong Joyang Machinery Co., Ltd. (Jinan, China); <https://loyal-microwavedryer.com> Shandong Loyal Industrial Co., Ltd <https://www.microwave-dryers.com> Zhengzhou Dingli, Henan Zhongji Huayuan Mechanical Engineering Co., Ltd.
16. Bandura, V., Yarovy, I., Marenchenko, O., & Pylypenko, E. (2019). Apparatus for drying vegetable raw materials by an electromagnetic field. *Scientific Works*, 82(2), 123-129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1242>
17. Yarovy, I., & Ali, V. (2021). Complex processing of raw materials using Addressable Energy Delivery technologies in the production of pectins. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2072>

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF THE PROCESS OF VEGETABLE RAW MATERIALS COMBINED DRYING

**Yaroyvi I.I., PhD, Associate Professor, Marenchenko O.I., PhD, Ali V.P., graduate student
Odesa National University of Technology, Odesa**

Abstract. Drying is one of the most energy-consuming processes in the food and processing industry. Scientists and engineers of many countries are constantly working on improving drying technologies, searching for new ways to remove moisture from raw materials and food products. For the traditional, convective drying method, a large number of its variations have been developed and implemented. However, the limitations of convective drying related to the physics of heat and mass transfer processes do not allow counting on a significant increase in energy efficiency and productivity of convective drying technologies. One of the competitors of the convective drying method is microwave drying, which uses principles different from the convective method of bringing heat energy to the moisture contained in the material. Microwave drying technologies are gradually moving from the category of innovative high-tech methods of moisture removal to the category of specialized but available to the manufacturer processes. The paper presents a generalized analysis of the microwave method of drying wet materials and its main advantages. The development of the microwave drying method by combining it with filtration drying is considered. The advantages of this combined method of drying are given. An analysis of current technical and technological limitations in the design of microwave equipment for drying vegetable raw materials is presented. Here is a list of structural and technological problems that should be solved in the process of creating belt microwave dryers. A brief overview of industry-typical technological equipment for microwave processing of vegetable raw materials and wet materials in general is presented. A modular design of a microwave drying unit is proposed and its main components are described. Generalized results of experimental modeling of the moisture removal process in a microwave belt dryer are presented. Conclusions on the prospects of introducing microwave drying technologies into the existing technological processes of the food and processing industry are provided.

Keywords: microwave drying, combined drying, barodiffusion, construction of microwave drying devices.

Список використаної літератури

1. Мерко І.Т. Наукові основи і технологія переробки зерна. Одеса, 2001. 348с.

2. Станкевич, Г. М. Сушіння зерна : підручник. / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, А. В. Борта. — Вид. 2-ге, перероб. і допов. — Одеса : КП ОМД, 2021. — 248 с.
3. Шутюк, В. В. Застосування мікрохвильового випромінювання для сушіння харчових продуктів / В. В. Шутюк // Наукові праці НУХТ. — К. : НУХТ, 2015. — Т. 21, № 3. - С.133-140.
4. 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>
5. Бурдо, О. Г. Эволюция сушильных установок [Текст] : монография / Бурдо Олег Григорьевич. - Одесса : Полиграф, 2010. - 368 с. : табл., рис. - Библиогр.: 122 назв. - ISBN 978-966-8788-98-7.
6. Guzik, P., Kulawik, P., Zając, M., & Migdał, W. (2021). Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(29), 7989–8008. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871>
7. Luis González-Cavieles, Mario Pérez-Won, Gipsy Tabilo-Munizaga, Erick Jara-Quijada, Rodrigo Díaz-Álvarez, Roberto Lemus-Mondaca, Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products, *Trends in Food Science & Technology*, Volume 116, 2021, Pages 626-638, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005>.
8. 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
9. Математическая модель микроволновой ленточной сушилки / О. Г. Бурдо, Е. И. Маренченко, Е. А. Пилипенко, В. В. Балагура // Інноваційні енерготехнології - 2017: зб. пр. VI Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 4-8 верес. 2017 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. - Одеса, 2017. – С. 381–389.
10. Використання механодифузійного ефекту при виробництві концентрованих поліекстрактів [Текст] / О. Г. Бурдо, Ю. Альхурі, І. В. сиротюк etc. // Харчова наука і технологія : наук.-вироб. журн. — Одеса : ОНАХТ, 2018. — Т. 12, № 3. — С.97-108.
11. Атаманюк В.М., Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів : монографія / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький - Львів: Видавництво - Львівська політехніка, 2013. – 276 с.
12. Опис твердотільних мікрохвильових генераторів [Електронний ресурс] [Solid State Generator - Fricke und Mallah](#)
13. Характеристики промислових мікрохвильових генераторів 2М290 [Електронний ресурс] 2М290 Original LG water cooled 3000w industrial microwave magnetron
14. Виробник програмного забезпечення для моделювання НВЧ пристроїв [Електронний ресурс] www.cst.com
15. Виробники мікрохвильового обладнання [Електронні ресурси] <https://www.joyangmachine.com> Shandong Joyang Machinery Co., Ltd. (Jinan, China); <https://loyal-microwavedryer.com> Shandong Loyal Industrial Co., Ltd <https://www.microwave-dryers.com> Zhengzhou Dingli, Henan Zhongji Huayuan Mechanical Engineering Co., Ltd.
16. Бандура, В., Яровий, І., Маренченко, О., & Пилипенко, Є. (2019). Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем. *Scientific Works*, 82(2), 123-129. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1242>
17. Яровий, І., & Алі, В. (2021). Комплексна переробка сировини з використанням технологій Адресної доставки енергії у виробництві пектинів. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2072>

Отримано в редакцію 09.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 09.08.2024
Approved 25.09.2024