

Розробка технології інтенсивної мікрохвильово-теплової обробки гетерогенних середовищ

Б. О. Дем'янчук, Н. О. Колесниченко, О. П. Угольніков, О. О. Лапкін

Запропонована технологія інтенсивного, енергоекономічного мікрохвильово-теплого масопереносу під час миття і сушіння аграрної та промислової продукції в мікрохвильовій нерезонансній камері з рівномірним полем нагріву. Камера оснащена вакуумним насосом і ультразвуковим генератором та функціонально зв'язана з випарником та конденсатором теплового насоса. Режиму біжучої хвилі в мікрохвильовій камері та інтенсивному випаруванню сприяють мікрохвильовий концентратор енергії поля в обсязі середовища та поглинаюче феритове покриття-перетворювач баластової енергії поля в теплову на перфораційній перегородці для продукції. Обґрунтовано напрям розвитку фізико-технічних основ мікрохвильово-теплової обробки середовищ, з метою миття продукції з застосуванням у вакуумній камері ультразвукового і мікрохвильового генераторів для інтенсифікації миття. Показана необхідність розвитку теорії і практики синтезу, виготовлення і застосування радіопоглинаючих матеріалів-перетворювачів енергії поля в теплову енергію. Запропоновано узгоджене комплексування модернізованої мікрохвильової та додаткової конвекційної технології сушіння. Метою узгодження є отримання і використання синергетичного ефекту, а саме: економічного, інтенсивного та екологічно безпечного масопереносу вологи під час сушіння середовища, яке оброблюється.

Виявлено, що енергоекономічності процесу повного висушування в середині камери сприяють інтенсивне випарування вологи із продукції в рівномірному за обсягом електромагнітному полі та поточне осушення вологого повітря у випарнику теплового насоса. Сухе повітря подають в мікрохвильову камеру після його нагріву конденсатором теплового насоса. Це сприяє суттєво більш ефективному миттю-сушінню продукції на основі розвитку теорії і практики цього процесу. Застосування цього схемного рішення і раціональних параметрів режиму на практиці дозволяє вирішити суперечну проблему підвищення ефективності та екологічності процесів в побуту та в аграрному і промисловому виробництві.

Ключові слова: мікрохвильово-тепловий масоперенос, нерезонансна мікрохвильова камера, покриття-перетворювач, тепловий насос

1. Вступ

Під висловленням «мікрохвильово-теплова інтенсивна обробка гетерогенних середовищ» розуміють, перш за все, технологічно завершений, інтенсивний за часом процес миття і енергоекономічного сушіння продукції і виробів, який послідовно містить етапи:

а) екологічно безпечного миття без шкідливого електромагнітного випромінювання із камери і без застосування мийних засобів (хімічних речовин);

б) повного висушування, зневоднення (в мікрохвильовій камері без центрифуги) дисперсних і суцільних середовищ із сукупності: продуктів живлення – фруктів, овочів; промислової продукції – тканини, легкого одягу і т. ін.

Проблемним є зараз вирішення цього завдання як за допомогою традиційної технології мікрохвильової обробки указаних середовищ, так і, окремо, за допомогою традиційної технології теплового нагріву середовищ за допомогою теплового насоса. Проблема залишається навіть за умов комплексування з кожною з цих технологій традиційного сушіння за допомогою центрифуги.

Мікрохвильова (традиційна) обробка середовищ у відкритому просторі спричиняє променево небезпечність для операторів та перешкоди для іншої електронної апаратури. В закритій металевій камері традиційна обробка не забезпечує рівномірного нагріву середовища у всьому його обсягу. При цьому, за умов традиційної мікрохвильової дії, спостерігаються наступні ефекти:

- нерівномірний розподіл енергії електромагнітного поля в камері, через це не гарантується керована та контрольована інтенсивність нагріву середовища; стоячі хвилі в середовищі, що обробляється, перешкоджають співпадінню напрямів градієнтів температури, тиску і вологи із середини обсягу назовні та унеможливають реалізацію інтенсивного нагріву складових середовища;

- неможливості інтенсифікації мікрохвильового нагріву середовища без ризику локальних перегрівів в місцях максимумів поля у просторі обсягу всього середовища, які повторюються з інтервалом, що дорівнює половині довжини хвилі поля в камері;

- випромінювання із традиційної мікрохвильової камери, по стінках якої протікають поверхневі струми, тому потрібні складні додаткові заходи для захисту людини і електронної апаратури;

- існування міжнародних стандартів для припустимих рівнів фонового випромінювання потужного мікрохвильового обладнання, але контроль дотримання стандартів є незадовільним.

Саме ці фізико-технологічні ефекти і невирішені в теорії та на практиці їх наслідки спричиняють і підкреслюють актуальність визначення технології миття-сушіння продукції в побуту, у господарствах фермерів та у виробництві.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В статті [1] досліджені три метода сушіння (гарячим повітрям (HAD), мікрохвильове вакуумне сушіння (MVD) і комбінований метод (HAD+MVD)) для сушіння частинок манго. Результати показали неоднорідності сушіння для шматочків манго, що були висушені HAD або MVD. Зразки, що висушені HAD, мали більшу вологу в центрі, але ті, що висушені MVD, показали протилежний результат. Рівномірність сушіння була покращеною, коли HAD і MVD були об'єднані.

Цей результат підтверджує необхідність застосування комбінованих методів, але також принципову необхідність мікрохвильового сушіння в камері з рівномірним за обсягом електромагнітним полем. Саме це забезпечує і якість, і інтенсивність процесів обробки без ризику пошкодження продукції.

В статті [2] здійснюється огляд технологій сушіння, дегідратації на основі мікрохвильового випромінювання для промислового застосування. Однак досі

ці методи частіше перебувають у сфері експериментів. В мікрохвильовому промисловому сушінні спостерігаються як переваги, так і недоліки.

Дійсно, недоліки аналогів полягають у відсутності реалізації в традиційному мікрохвильовому обладнанні (для сушіння) технологічного режиму «бігучої хвилі» для інтенсивного, якісного і енергоефективного миття-сушіння виробів.

В статті [3] запропоноване переривчасте конвекційне мікрохвильове сушіння (IMCD) – це передова технологія, яка підвищує як енергетичну ефективність, так і якість продукції під час сушіння. Моделювання IMCD має важливе значення для розуміння фізики і удосконалення процесу сушіння і для оптимізації рівня мікрохвильової потужності та періодичності дій поля протягом сушіння. В цьому дослідженні розроблена математична модель для IMCD та її адекватність підтверджена експериментальними даними. Модель показала, що внутрішня температура матеріалу була вище, ніж його поверхня в IMCD, і що температура перерозподілялася через переміжність мікрохвильової потужності. Це може суттєво сприяти покращенню якості продукції.

Рекомендовано у разі використання традиційних мікрохвильових камер застосовувати лише щадний режим дії стоячої хвилі на продукцію, тобто збільшувати рівномірність нагріву лише за рахунок теплообміну. Але при цьому краще застосовувати не «стоячі» мікрохвилі, а – духовку, яку гріють дровами.

У роботі [4] представлений аналіз енергоефективності теплових систем, що має практичне значення з ряду причин. Цикли і процеси, що застосовуються в теплових системах, існують в дуже різних конфігураціях, що ускладнює порівняння, якщо для аналізу конкретних термічних систем потрібні конкретні моделі. Теплові системи з невеликими перепадами температур між гарячою та холодною сторонами також страждають від труднощів через вплив невизначеності точки переносу тепла.

Такі чіткі моменти є наслідками особливостей проектування теплових систем і тому повинні бути інтегровані в глобальну оцінку. При оптимізації теплових систем детальний аналіз генерації ентропії підходить для виявлення втрат продуктивності, викликаних компонентами циклу. У аналізі рослин подібна логіка застосовується з тією різницею, що теплова система тоді є лише складовою, часто промислово стандартизованою, однак не розглядається завдання динаміки інтенсивного за часом сушіння продукції. Наведено вплив нелінійної граничної умови на оборотний тепловий коефіцієнт корисної дії та обговорюється співвідношення середньої реальної ефективності теплового насоса з урахуванням лінійних та нелінійних граничних умов. Це є доцільним для проведення дослідження, яке присвячено розробці технології інтенсивної мікрохвильово-теплової обробки гетерогенних середовищ. Однак ця стаття не містить фізико-технічних рекомендацій для інтенсифікації та збільшення якості процесу миття-сушіння в умовах узгодженої дії мікрохвильового генератора і теплового насоса.

У статті [5] охарактеризовані композиції феромагнітних наночастинок CoFe_2O_4 та два провідні полімери (поліетилендіокситіофен-PEDOT- та поліпірол-PP-). Обидва синтези здійснювали полімеризацією мономерів в присутності дисперсних магнітних наночастинок CoFe_2O_4 при різних мольних співвідношеннях мономерів. Для PP-композитів як примусове поле, так і прикладне по-

ле, необхідні для досягнення максимального зменшення намагніченості зі збільшенням полімеру. Вимірювання електропровідності вказують на те, що для обох типів композитів високий вміст полімеру призводить до високої електропровідності. Ці результати свідчать про те, що властивості композиту можна модулювати, змінюючи ідентичність полімеру та молярне співвідношення мономер: CoFe_2O_4 , що є важливим для синтезу радіопоглинаючих матеріалів-перетворювачів енергії поля в теплову енергію.

Недоліком технології є відсутність порівняння отриманих результатів з результатами, що потрібні для практики.

У роботі [6] представлені результати моделювання процесу передачі тепла в неоднорідних середовищах з припущенням, що частина теплового потоку розпорошується у повітрі навколо променя. Процес передачі тепла у твердому матеріалі (пучку) може бути описаний за допомогою часткового диференціального рівняння цілого порядку. Однак у гетерогенних середовищах це може бути описано суб- або гіпердифузійним рівнянням, що призводить до часткового диференціального рівняння дробового порядку. Беручи до уваги, що частина теплового потоку розпорошується в сусіднє середовище, додатково змінюють основне співвідношення між тепловим потоком і температурою, і отримують в цьому випадку рівняння тепловіддачі в новому вигляді. Це призводить до функції передачі, яка описує залежність між тепловим потоком на початку променя і температурою на заданій відстані.

Застосування теоретичних результатів для реалізації процесу інтенсивного масопереносу під час дії на гетерогенні середовища не надано.

У роботі [7] вирішується завдання розширення діапазону ефективного коефіцієнта поверхневої масопередачі та розглядається неоднорідний розподіл поверхнево-реактивних кругових пластирів першого порядку. Для розрахунків використовують аналітичні та граничні інтегральні методи. Отримано (до нерозведеної фракції ділянки пластиру) ефективну граничну умову транспортування до пластирів, що залежить від локального коефіцієнта масообміну (або швидкості реакції) та швидкості зсуву. Продемонстровано, що ця гранична умова замінює деталі гетерогенних поверхонь на нормальній ефективній відстані ковзання, також визначається для нерозбавлених фракцій площі пластиру. Відстань ковзання залежить від швидкості зсуву, слабо залежить від швидкості реакції та розмірів пластиру. Ці ефективні граничні умови можуть використовуватися безпосередньо у масштабних фізичних моделюваннях до того часу, поки відомими є локальний коефіцієнт зсуву, швидкість реакції та фракція площі пластиру.

Представлені у статті [7] математичні методи є важливими при вивченні інтенсивної мікрохвильово-теплової обробки гетерогенних середовищ, але не є достатніми для моделювання теплового аналізу мікрохвильово-теплого процесу.

У статті [8] надані тривіальні підходи до отримання композитів для захисту від електромагнітних перешкод на основі епоксидної бази та вуглецевого волокна. Наночастинки наповнювача Fe_3O_4 NP гомогенне диспергувались в епоксидній матриці після поверхневої модифікації за допомогою силанового сполучного агента. Досліджено електромагнітні властивості екранування перешкод у

поєднанні зі складною проникністю композитів у діапазоні 8,2–12,4 ГГц. Загальна ефективність екранування (SET) збільшується зі збільшенням навантажень наночастинок Fe_3O_4 NP. Включення Fe_3O_4 NP в композити підвищує складну проникність, тим самим підвищуючи здатність поглинання електромагнітних хвиль. Збільшення SET, де домінують втрати поглинання, пояснюється посиленими магнітними втратами та діелектричними втратами, що утворюються Fe_3O_4 (NP) та багатошаровою конструкцією композитів. Мікрохвильова провідність збільшується, а глибина проникнення зменшується зі збільшенням навантажень Fe_3O_4 (NP). Для даного дослідження було важливо проаналізувати процеси електромагнітного екранування зі складною проникністю композитів.

Але ці, отримані авторами, результати мають тривіальний характер і відомі більш ніж півтора десяти років, наприклад, [10].

В [9] запропоновано метод корекції хвильових опорів модифікованих радіопоглинаючих композитів з гетерогенними наповнювачами у вигляді зваженої суміші фериту і карбиду кремнію в термоеластопластовій матриці. Метод сприяє забезпеченню відсутності відбиття енергії поля від поверхні поглинаючого покриття шляхом узгодження відносних діелектричної та магнітної проникності, що нормовані відповідними сталими повітря. Метод сприяє також забезпеченню потрібного значного рівня погонного поглинання енергії електромагнітного поля покриттям з товщиною, яка не перевищує одного міліметра. Перевага застосування полімеру у виді термоеластопласту полягає в його вологостійкості та у достатній термостійкості, що дорівнює понад 200 °С.

В роботі [10] запропоновано Спосіб отримання магнетиту та обґрунтована технологія термохімічного синтезу дисперсних феритових оксидів перехідних металів системи Fe_3O_4 з молекулярною структурою шпінелі оберненого типу (патент № 75749 України від 15.05.2006). Надано аналіз фізичних механізмів під час реалізації технології, що впливають на результати синтезу і практичного застосування речовини з потрібними електрофізичними властивостями. Саме в цій роботі надані рекомендації для практичного застосування цього наповнювача у складі композитного покриття для забезпечення рівномірного за обсягом поля в камері мікрохвильового нагріву та для зменшення завадового випромінювання із камери. Також рекомендовані шляхи забезпечення переваг цієї сполуки під час практичного застосування в якості наповнювача полімерної матриці будь-яких радіопоглинаючих покриттів. Зокрема, одною з рекомендацій є узгодження хвильових опорів діелектричних середовищ на межі розділу повітря-середовище. Для цього доцільним є точний вимір параметрів, складових комплексної проникності середовищ з електромагнітними втратами. Це необхідно для цілеспрямованої корекції параметрів, з метою, по-перше, забезпечення відбиття енергії поля, близького до нульового рівня. По-друге, це необхідно для забезпечення погонного поглинання енергії електромагнітної хвилі на рівні 12...15 дБ/мм у разі, коли покриття наноситься на металеву поверхню. Саме такі поглиначі енергії електромагнітного поля є основою для будування покриття для перфораційної перегородки в мікрохвильово-тепловій машині, яка реалізує технологічний процес, який запропоновано у статті.

В [11] знайдено фізико-технічне рішення для збільшення термостійкості покриття та коефіцієнта погонного поглинання їм енергії електромагнітного поля в тонкому шарі покриття-перетворювача, без втрати його механічної потужності. Термоеластопластова основа цього покриття методом вібраційної обробки виконана полімеризаційно-наповненою та містить хімічно зв'язані молекули полімеру і оксиду. Таке рішення дає можливість активізувати процес миття і сушіння без ризику пошкодити продукцію в місцях максимумів поля стоячої хвилі. Це також запобігає механічному пошкодженню продукції під час подачі в камеру атмосферного повітря після миття продукції у вакуумній мікрохвильовій нерезонансній камері.

Суттєвий вигащ в економії енерговитрат на масопереніс під час сушіння продукції (приблизно у 3...4 рази) дає сумісна об'ємна дія електромагнітного поля і теплового насоса у складі випарника і конденсатора. Цей узгоджений процес реалізується за допомогою вентилятора-нагнітача, завдяки відбору (в оточенні випарника) вологі з повітря мікрохвильової камери. Далі здійснюється подальший нагрів сухого повітря в оточенні конденсатора теплового насоса в зоні теплової активізації процесу масопереносу вологи. Відбір теплового повітря від конденсатора теплового насоса і подача його в камеру узгодженого сушіння, тобто у зону мікрохвильово-теплового сушіння здійснюється за допомогою іншого вентилятора.

Невирішеними питаннями в цьому інформаційному джерелі є, по-перше, обґрунтування вимог до фізико-технічних параметрів мікрохвильового обладнання під час досягнення мети мікрохвильово-теплового масопереносу. По-друге, невизначеними є рівні температурних параметрів протягом реалізації режиму функціонування обладнання теплового насоса, що є узгодженим з рівнем мікрохвильового нагріву середовища, а саме, повітря на вході теплового насоса.

Загальною для більшості публікацій невирішеною частиною проблематики є визначення не тільки параметрів тепломасопереносу. Невирішеним завданням є загальний рівень енергоекономічності та екологічної безпечності для більш широкого розповсюдження в побуті і у виробництві процесу нерезонансної мікрохвильово-теплової обробки гетерогенних середовищ.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є наукове обґрунтування фізико-технічних механізмів і параметрів процесу, які сприяють реалізації технологічних основ мікрохвильово-теплової, енергоекономічної, інтенсивної та екологічно безпечної обробки гетерогенних середовищ.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

– обґрунтувати доцільний варіант функціональних елементів обладнання для реалізації технології автоматизованої, якісної, мікрохвильово-теплової, економічної, інтенсивної, та екологічно безпечної обробки гетерогенних середовищ, тобто миття і сушіння продукції різного типу та визначити технічні засоби для реалізації в мікрохвильовій камері інтенсивного і безпечно миття без застосування хімічних миючих засобів, без перегріву і недогріву продукції, а також без шкідливого випромінювання поля із камери;

– визначити потрібні параметри поверхневого покриття з електропровідним поглиначем у вигляді магнетиту, з метою узгодження хвильових опорів повітря і поглинаючого покриття;

– визначити засоби для економічного і повного видалення вологи без центрифуги із середовища на етапі його повного висушування.

4. Обґрунтування доцільного варіанта функціональних елементів мікрохвильово-теплового обладнання

Мийно-сушильне технологічне обладнання необхідно для якісної і енергоекономічної обробки будь-якої продукції, наприклад, фруктів, овочів, лікарських рослин, тканини, теплоізоляційних матеріалів в промислових, польових та побутових умовах. Воно повинно реалізувати функції миття за допомогою води будь-якої початкової температури та без застосування мийних засобів. Осушення продукції повинно бути повним, в камері після миття, без застосування центрифуги.

Для досягнення необхідного технічного результату мікрохвильово-теплове обладнання доцільно оснастити: металевим корпусом; камерою зі шлюзом і ущільненням та з розташованою в неї горизонтальною перфорованою перегородкою і блоком створення вакууму. Блок повинен здійснювати розрідження повітря до рівня 0,30...0,50 МПа і бути з'єднаним крізь клапан з верхньою частиною камери, ультразвуковим випромінювачем коливань на частоті 25...30 кГц, з розташованим в середині камери.

Крім того, обладнання доцільно оснастити: відсічними електрокеруваними клапанами подачі в камеру і скидання з камери води та відкачки і подачі повітря; випромінювачем електромагнітних хвиль; мікрохвильовим генератором на частоті 2,4...2,5 ГГц. Вихід генератора повинен бути з'єднаним зі входом випромінювача; радіопрозорим кварцовим шлюзом з ущільненням в боковій стінці верхньої частини камери, який є жорстко з'єднаним з вихідним розкритом випромінювача електромагнітних хвиль.

Випромінювач електромагнітних хвиль повинен містити лінзу корегування фронту хвилі таким чином, щоб розміри розкриття випромінювача були обернено пропорційними відповідним розмірам горизонтальної перфорованої перегородки для продукції. Це сприятиме концентрації енергії поля у кутовому секторі, розміри перерізу якого в картинній площині узгоджені з розмірами перерізу обсягу продукції, що завантажується на горизонтальну перфоровану перегородку.

На цієї перегородці доцільно розташувати термоеластопластове феритове покриття-перетворювач баластової електромагнітної енергії в теплову.

Блок живлення та управління доцільно підключити до блоку створення вакууму, до мікрохвильового генератора, до ультразвукового випромінювача і до відсічних електрокеруваних клапанів.

Мікрохвильово-теплове обладнання доцільно обов'язково оснастити не тільки зоною мікрохвильової активізації миття-сушіння, але і зоною теплової активізації процесу сушіння у складі: послідовно з'єднаних компресора, конденсатора, дросельного вентиля і випарника.

Указані дві зони доцільно розділити вертикальною перегородкою з вентиляційними шлюзами, в які повинні бути вмонтовані вентилятор нагнітання вологого повітря до випарника і вентилятор відбору сухого теплого повітря від конденсатора теплового насосу.

Блок живлення та управління, доцільно підключити також до вентиляторів та до компресора.

Термоеластопластове феритове покриття-перетворювач баластової електромагнітної енергії в теплову енергію розташоване в зоні мікрохвильової активізації миття-сушіння на горизонтальній перфорованій перегородці. Це покриття доцільно виконати полімеризаційне наповненим дисперсним магнітним електропровідним наповнювачем у вигляді оксиду перехідних металів, у виді сполуки ферит-феритової шпінелі.

Як миття, так і сушіння за допомогою постійного і рівномірного за обсягом мікрохвильового нагріву води і продукції здійснюється в камері інтенсивно та енергоекономічно. Це здійснюється за рахунок об'ємного нагріву вологої продукції або виробу електромагнітним полем без неконтрольованих локальних перегрівів і недогрівів цієї продукції, завдяки відсутності у камері «стоячих» хвиль.

Цей вид поля спричиняється відсутністю у камері хвиль, що відбиті від перфорованої перегородки, завдяки застосуванню в камері термоеластопластового феритового покриття-перетворювача баластової електромагнітної енергії в теплову енергію. Це покриття є полімеризаційне наповнене та містить дисперсний магнітний електропровідний наповнювач, оксид перехідних металів, у виді сполуки $\text{Fe}_3\text{O}_4 = (\text{Fe})^{2+}(\text{Fe}_2)^{3+}(\text{O}_4)^{2-}$ з молекулярною структурою шпінелі оберненого типу.

Указаний дисперсний магнітний електропровідний наповнювач має питому електропровідність, що дорівнює $10^3 \dots 10^4$ См/м, тобто має рівень, що перевищує відомі подібні наповнювачі на сім і більше порядків.

Сутність побудови і функціонування мікрохвильово-теплового обладнання, яке розроблено авторами, більш детально пояснюється за допомогою рис. 1, де схематично показано загальну конструкцію цього обладнання.

Будова корпусу 1. В корпусі 1 розміщена камера 2 зі шлюзом 3 з ущільненням та з розташованою в середині неї горизонтальною перфорованою перегородкою 4. Блок створення вакууму 5 у вигляді вакуумного насосу є з'єднаним з верхньою частиною об'єму камери 2, з метою запобігання прямого контакту каналу створення вакууму з водою для миття продукції. Ультразвуковий випромінювач 6 є розташованим всередині камери 2, так щоб завжди був розташованим нижче за мінімальний рівень води для миття продукції з використанням кавітаційного ефекту на частоті механічних коливань, яка дорівнює 20–30 кГц.

Відсічні клапани 7–10 є розташованими на вході (виході) камери 2 і забезпечують: 7 – подачу води в камеру 2; 8 – скидання води після миття продукції; 9 – відкачку повітря із камери 2 за допомогою блоку 5, з метою зменшення витрат енергії ультразвукового генератора у водному середовищі під час миття; 10 – випуску-подачі повітря.

Подача атмосферного повітря в камеру 2 після закінчення етапу миття виробів або продукції та відкриття клапану 8 скидання води забезпечує функцію сушіння на першому етапі.

Випромінювач електромагнітних хвиль 11 є з'єднаним жорстко своїм входом з виходом мікрохвильового генератора 12, а виходом – з радіо прозорим кварцовим шлюзом 13, який має ущільнення в боковій стінці камери 2.

Термоеластопластове феритове покриття-перетворювач 16 баластової електромагнітної енергії в теплову є розташованим на горизонтальній перфорованій перегородці 4. Випромінювач електромагнітних хвиль містить лінзу 14 корегування фронту хвилі.

Розміри розкриву випромінювача є обернено пропорційними відповідним розмірам горизонтальної перфорованої перегородки 4. Це сприятиме концентрації енергії у кутовому секторі, розміри перерізу якого узгоджені з розмірами перерізу обсягу продукції на перфорованій перегородці 4.

Блок 15 живлення та управління є підключеним до блоку створення вакууму 5, до мікрохвильового генератора 12, до ультразвукового випромінювача 6 та до відсічних електрокерованих клапанів 7–10.

Крім того, мікрохвильово-теплова машина додатково містить: зону 17 мікрохвильової активізації миття-сушіння продукції і зону 18 теплової активізації процесу сушіння у складі послідовно з'єднаних компресора 19, конденсатора 20, дросельного вентиля 21 і випарника 22.

Зони розділені вертикальною перегородкою 23 з вентиляційними шлюзами. В шлюзи вертикальної перегородки 23 вмонтовані вентилятор 24 нагнітання вологого повітря до випарника 22 і вентилятор 25 відбору теплого повітря від конденсатора 20.

Блок 15 живлення та управління підключений також до вентиляторів 24, 25 та до компресора 19. Термоеластопластове феритове покриття-перетворювач 16 баластової електромагнітної енергії в теплову енергію, що розташовано на горизонтальній перфорованій перегородці 4, є полімеризаційне наповненим та містить дисперсний магнітний електропровідний наповнювач.

Швидкий масопереніс згідно до технології, яку реалізує мікрохвильово-теплове обладнання, спричиняється природним погодженням напрямків (із середини зразків продукції, яку сушать, назовні) градієнтів трьох фізичних параметрів продукції, а саме: вологи, температури і тиску пари.

Саме цей ефект досягається лише за умов відсутності у камері стоячих хвиль, перш за все, завдяки термоеластопластовому феритовому покриттю-перетворювачу 16, що нанесене на горизонтальну перфоровану перегородку 4.

Покриття поглинає баластову електромагнітну енергію поля, рівень якої суттєво збільшується на етапі досушування, тому що покриття-перетворювач 16 є полімеризаційне наповненим. Перетворювач містить концентрований дисперсний магнітний електропровідний наповнювач, оксид перехідних металів, у виді сполуки $\text{Fe}_3\text{O}_4 = (\text{Fe})^{2+}(\text{Fe}_2)^{3+}(\text{O}_4)^{2-}$ з молекулярною структурою шпінелі оберненого типу.

Указаний наповнювач забезпечує сумірні відносні діелектричну і магнітну проникності та високу електропровідність покриття-перетворювача. Саме це є необхідними і достатніми умовами для невідбиваючого поглинання баластної енергії електромагнітного поля в камері 2, навіть на етапі кінцевого досушування продукції. На цьому етапі продукція містить малу кількість вологи, тому стає більш

радіопрозорою. Цей фактор потребує переходу до етапу конвекційного сушіння сухім і теплим повітрям від конденсатора із зони теплової машини.

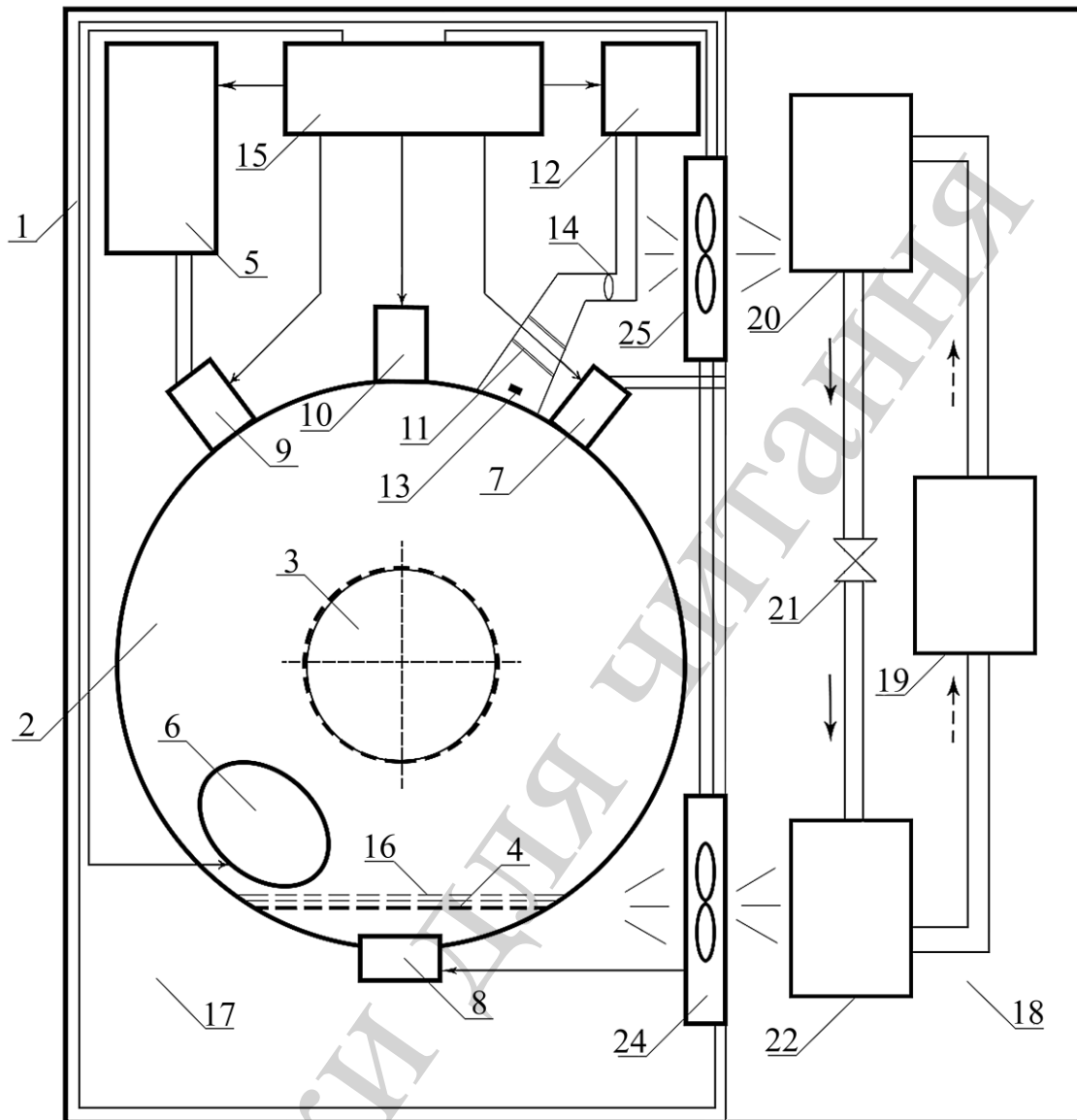


Рис. 1. Схема конструкції мікрохвильово-теплового обладнання: 1 – корпус; 2 – камера; 3 – шлюз; 4 – перфорована перегородка; 5 – блок створення вакууму; 6 – ультразвуковий випромінювач; 7, 8, 9, 10 – відсічні клапани (подачі води, скидання води, відкачки повітря, випуску-подачі повітря); 11 – випромінювач; 12 – мікрохвильовий генератор; 13 – кварцовий шлюз; 14 – лінза корегування фронту хвилі; 15 – блок живлення та управління; 16 – покриття-перетворювач баластової електромагнітної енергії; 17 – зона активізації миття-сушіння; 18 – зона теплової активізації сушіння; 19 – компресор; 20 – конденсатор; 21 – дросельного вентиль; 22 – випарник; 23 – вертикальна перегородка; 24, 25 – вентилятори нагнітання, відбору повітря

Важливо підкреслити, що реалізується процес інтенсивного, тобто прискореного, економічного, екологічно стерильного, рівномірного та повне сушіння

продукції, особливо, наприклад, фруктів і овочів. Здійснюється повно висушування тканини без центрифуги. Все це є особливо корисним на практиці у виробництві, у фермерських господарствах і в побуту, тому що завжди є невирішеною проблемою.

Підкреслимо, що температура мікрохвильового нагріву вологого полімерного середовища продукції під час сушіння за допомогою деякої традиційної камери, зі стоячою хвилею у максимумах електромагнітного поля може досягати 260 °C і більше. Це відповідає температурі локального неконтрольованого підпалення та деструкції продукції. Тому застосування різного відомого обладнання подібного призначення, через неконтрольований процес мікрохвильового нагріву і локальних перегрівів, є зовсім небезпечним.

Під час застосування традиційної технології сушіння, це потребує щадного режиму сушіння, тобто занадто тривалого сушіння з малим рівнем потужності генератора. Активне сушіння з високим рівнем потужності мікрохвильового генератора є занадто ризикованим.

Процес ефективного якісного миття і повного висушування продукції згідно до технології, що пропонується, починається і завершується в середині камери 2, тобто без потреби здійснювати це у відкритому просторі.

Таким чином, на заключному етапі масопереносу під час досушування практично радіопрозорі продукції за допомогою нової технології починає активно функціонувати феритове покриття-перетворювач 16 баластної енергії поля. Це забезпечує запобігання хвиль, які відбиті від горизонтальної перфорованої перегородки 4, а саме, запобігання перегрівам продукції. А функціонування блоку теплової машини забезпечує ефективний та енергоекономічний конвекційний масопереніс з метою повного осушування.

Після цього блок управління, згідно до встановленому режиму миття-сушіння, вимикає генератор, компресор і вентилятори. Після відчинення шлюзу 3 з ущільненням, суха продукція повністю готова для вживання або тривалого надійного зберігання.

Покажемо далі необхідність і можливості отримання потрібних властивостей компонентів нового мікрохвильово-теплового обладнання.

Реалізація переваг процесу миття-сушіння за допомогою сукупності суттєвих конструкційних ознак в розглянутій мікрохвильово-тепловій машині, що пропонується, потребує нових властивостей елементів цієї машини.

По-перше, запобігання відбиттю енергії електромагнітного поля від поверхні термоеластопластового феритового покриття-перетворювача 16 баластової електромагнітної енергії в теплову, що нанесено на горизонтальну перфоровану перегородку 4 камери 2.

По-друге, технологія потребує інтенсивного загасання баластової електромагнітної енергії поля в цьому покритті. Цим вимогам задовольняє покриття-перетворювач 16 з електропровідним феритовим наповнювачем для полімерної термоеластопластової основи з сумірними відносними рівнями діелектричної та магнітної проникності. Ці рівні проникності повинні бути нормовані відповідними електромагнітними сталими повітря.

Указані властивості досягаються лише завдяки феритовому магнітному наповнювачу з напівпровідниковою електропровідністю на рівні $10^3 \dots 10^4$ См/м. Ці вимоги потребують далі додаткового обґрунтування.

5. Визначення потрібних параметрів поверхневого покриття в мікрохвильовій камері з електропровідним поглиначем

Для обґрунтування необхідних кількісних значень коефіцієнта відбиття і коефіцієнта проходження одношарового поглинаючого покриття визначимо електродинамічні параметри деякого діелектричного середовища. Це середовище є ізотропним з електромагнітними втратами, тобто має сторонні струми.

Електромагнітне поле в цьому середовищі залежить від довжини шляху z хвилі, що біжить, яка розповсюджується після межі «повітря-покриття» та після першого етапу сушіння продукції, що обробляється. Поле залежить також від комплексних величин діелектричної і магнітної проникності, тобто від параметрів, що характеризують відбиваючі та поглинаючі властивості.

Важливою вимогою до поглинаючого матеріалу є забезпечення в широкому діапазоні частот мінімального відбиття електромагнітної хвилі від межі розділу «повітря-покриття».

Практичне вирішення завдання порівнювання хвильових опорів середовищ повітря і матеріалу покриття, що граничать, зустрічає на практиці суттєві технічні труднощі.

Не менші труднощі з'являються при вирішенні завдання значного послаблення енергії поля в середовищі покриття, що перетворює енергію електромагнітного поля в теплову.

Визначимо спочатку необхідні умови для узгодження хвильових опорів повітряного середовища та поглинаюче покриття 1б, тобто середовища з втратами енергії поля.

Необхідними є оптимальні (за мінімуму коефіцієнта відбиття від поверхні композиту) співвідношення між величинами діелектричної і магнітної величин проникності та відповідних їм величин провідності композиту. Оптимальні значення визначаються шляхом розв'язання системи рівнянь в комплексній формі відносно характеристик композиту після визначення цього коефіцієнта відбиття хвиль.

Під час падіння плоскої однорідної електромагнітної хвилі за нормаллю (це найбільш несприятливий випадок) на межу поділу середовищ, комплексні амплітуди векторів напруженості падаючої, відбитої та пройденої в композит хвиль мають вид:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_m^0 &= \vec{x}_0 \dot{\vec{A}} e^{-jK_0 z}, \quad \dot{\vec{H}}_m^0 = \vec{y}_0 \frac{\dot{\vec{A}}}{W_0} e^{-jK_0 z}, \quad (z < 0); \\ \dot{\vec{E}}_m^- &= \vec{x}_0 \dot{\vec{B}} e^{-jK_0 z}, \quad \dot{\vec{H}}_m^- = -\vec{y}_0 \frac{\dot{\vec{B}}}{W_0} e^{jK_0 z}, \quad (z < 0); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{E}_m^+ = \bar{x}_0 \dot{C} e^{-jKz}, \quad \dot{H}_m^+ = \bar{y}_0 \frac{\dot{C}}{W} e^{-jKz}, \quad (z > 0),$$

де \dot{W}_0 і \dot{W} – хвильові опори повітря і композиту; K_0 і K – хвильові числа для цих середовищ.

Для коефіцієнтів відбиття хвилі ρ і проходження хвилі в середовище τ у вигляді

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{E}_m^-(0)}{\dot{E}_m^0(0)}, \quad \dot{\tau} = \frac{\dot{E}_m^+(0)}{\dot{E}_m^0(0)},$$

відповідно з (1) з урахуванням неперервності тангенціальних компонентів векторів напруженості на межі поділу середовищ, тобто згідно до системи

$$\begin{cases} \dot{E}_{m1\tau} = \dot{E}_{m2\tau} \\ \dot{H}_{m1\tau} = \dot{H}_{m2\tau} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{E}_{m\tau}^0 + \dot{E}_{m\tau}^- = \dot{E}_{m\tau}^+ \\ \dot{H}_{m\tau}^0 + \dot{H}_{m\tau}^- = \dot{H}_{m\tau}^+ \end{cases} \quad (2)$$

виходить система рівнянь, розв'язання якої дає залежність коефіцієнта відбиття і коефіцієнта проходження від параметрів композиту у вигляді:

$$\rho = \frac{\dot{W} - \dot{W}_0}{\dot{W} + \dot{W}_0}, \quad \tau = \frac{2\dot{W}}{\dot{W} + \dot{W}_0}. \quad (3)$$

Із (3) випливає, що при $\dot{W} = \dot{W}_0$ (середовища узгоджені) коефіцієнт відбиття дорівнює нулю, а коефіцієнт проходження поля із повітря в середовище дорівнює одиниці, що відповідає повному переходу енергії поля із одного середовища в інше.

Визначимо умови узгодження хвильових опорів середовищ крізь параметри композиту і повітря. Для середовища повітря хвильовий опір дорівнює:

$$\dot{W}_0 \approx \sqrt{\frac{\dot{\mu}_0}{\dot{\epsilon}_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}}} = 120\pi, \quad (4)$$

де $\dot{\mu}_0$, $\dot{\epsilon}_0$ – магнітна і діелектрична стали вакууму (а також повітря).

Для середовища з втратами хвильовий опір має вид:

$$\dot{W} = \sqrt{\frac{\dot{\mu}}{\dot{\epsilon}}} \approx \sqrt{\frac{\mu' - i\mu''}{\epsilon' - i\epsilon''}}, \quad (5)$$

$$\mu' = \mu_0 \mu, \quad \varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon, \quad \mu'' = \frac{\sigma_i}{\omega}, \quad \varepsilon'' = \frac{\sigma_y}{\omega};$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, \quad \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ Ф/м}, \quad (6)$$

де μ , ε – абсолютні магнітна і діелектрична проникності композита; μ , ε – відносні магнітна і діелектрична проникності композита; σ_i , σ_y – магнітний параметр втрат поля і питома електропровідність композита.

У відповідності до умов узгодження опорів середовищ у вигляді комплексного рівняння $\dot{W} = \dot{W}_0$, згідно до (4) і (5), одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \arctan\left(\frac{\sigma^M}{\omega\mu_0\mu}\right) = \arctan\left(\frac{\sigma^E}{\omega\mu_0\mu}\right), \\ \mu^2 + \frac{(\sigma^M)^2}{\omega^2\mu_0^2} = \varepsilon^2 + \frac{(\sigma^E)^2}{\omega^2\varepsilon_0^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язок системи (7) відносно σ^M / μ_0 і ε дає шукані співвідношення між параметрами композиту, при яких забезпечується мінімальне (практично нульове) відбиття. Потрібні параметри мають вигляд:

$$\varepsilon = \mu; \quad \sigma^M / \mu_0 = \sigma^E / \varepsilon_0. \quad (8)$$

Ці умови мають суттєве значення для вирішення на практиці завдань, а саме:

1) значного послаблення енергії відбитої хвилі поля від середовища-покриття з втратами;

2) послаблення інтенсивності поля усередині середовища-покриття, за умов допустимих значень товщини покриття-перетворювача енергії поля в теплову енергію.

Для вирішення першого завдання досить забезпечити виконання умови (8). Але для вирішення другого завдання у разі, коли поглинаючий матеріал є нанесеним, наприклад, на металеву поверхню, потрібно виконання і умови (8), і умови, згідно до (8), у вигляді нерівності:

$$\tan \delta_E = \tan \delta_M \gg 1, \quad (9)$$

де $\delta_E = \sigma_E / (\omega\varepsilon_0\varepsilon)$, $\delta_M = \sigma_M / (\omega\mu_0\mu)$.

Саме ці вимоги дозволяють забезпечувати необхідний великий рівень погонного поглинання енергії поля та малий рівень відбиття енергії поля від поглинаючого покриття, навіть що воно нанесено на металеву підложку.

Дійсно, коефіцієнт втрат енергії поля в товщі поглинаючого середовища, параметри якого погоджені, згідно до (1), (7), (8), дорівнює

$$K'' = \frac{\omega}{2c} \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \left(\frac{\sigma_E}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon} + \frac{\sigma_M}{\omega \mu_0 \mu} \right) = 120\pi\sigma \text{ Ом}/(\text{Ом} \cdot \text{м}). \quad (10)$$

Тому для забезпечення значного погонного послаблення поля в погодженому середовищі з втратами енергії поля, при товщині шару матеріалу, наприклад, $z=2$ мм, потрібно мати питому провідність середовища, що має порядок декількох Сименсів на метр.

За умов, що питома електропровідність цього синтезованого наповнювача, як правило, дорівнює $\sigma_E = 10^3 \dots 10^4$ См/м і більше, отримання необхідної питомої електропровідності готового покриття 16 на рівні 5 См/м нескладно. Тому, дійсно, при $\sigma_E = 5$ См/м з урахуванням (10) знаходимо необхідний безрозмірний показник міри загасання поля в покритті, який дорівнює

$$K''z = 120\pi \cdot \sigma_E \cdot z = 3.77. \quad (11)$$

Подвійне проходження хвилі через покриття товщиною 2 мм викликає послаблення її енергії у 2500 разів.

Подібний рівень показника міри загасання енергії поля в готовому поглинаючому покритті може бути досягнутий лише за допомогою наповнювачів у виді ферит-феритової шпінелі оберненого типу.

Подібні матеріали-наповнювачі є магнітними напівпровідниками з сумірними рівнями відносних діелектричної і магнітної проникності. Це відповідає вимогам до параметрів покриття, що отримані згідно до (8)–(10).

Розрахунки підкреслюють реальну можливість виконувати ці вимоги. Дані наповнювачі мають низький рівень енергії активації, отже, високу чутливість та широкий допустимий динамічний діапазон зміни інтенсивності вхідних дій електромагнітного поля на поглинаюче покриття.

Крім того, технологія термохімічного синтезу наповнювачів цього типу, а саме, Fe_3O_4 , NiCO_2O_4 та ін., не потребує дефіцитної сировини, дефіцитних катализаторів термохімічної реакції та не потребує складного обладнання і витрати часу.

Розглянемо сутність термохімічного синтезу наповнювача та полімеризаційного наповнення поглинаючого покриття.

Термохімічний синтез наповнювача спрямований на забезпечення необхідного повного рівня оберненості отриманої оксидної сполуки зі структурою ферит-феритової шпінелі. При цьому тривалентні катіони заліза повинні займати частину октаедричних позицій її елементарного молекулярного осередку, а інша частина саме таких позицій має бути зайнята двовалентними катіонами заліза.

Сумірність іонних радіусів цих катіонів забезпечує високу міру оберненості цієї сполуки, що є умовою надання їй потрібних напівпровідникових і магнітних властивостей.

Малі іонні радіуси двох- і тривалентних катіонів заліза сприяють високій рухливості носіїв заряду при їх дифузійному перескоку з катіона на катіон, тим самим має місце незвично малий рівень енергії активації носіїв заряду. Ця енергія дорівнює десятим і навіть сотим частинам електрон-Вольт.

Малий рівень магнітної в'язкості (інерції) цього матеріалу проявляється в малому значенні часу його релаксації. Тобто матеріал має малий час зміни напрямку орієнтації магнітних спін-спінових і спін-орбітальних моментів під дією енергії електромагнітного поля, що потрапляє на поверхню поглинаючого покриття.

Технологія отримання наповнювача полягає в спіканні протягом одної години (здійснення реакції відновлення) суміші простого оксиду Fe_2O_3 хімічно активним технічним вуглецем у присутності кисню повітря.

Така технологія має переваги перед відомими (наприклад, перед методом хімічного осадження солей металів або гідрооксидів цих металів) не лише за якістю отриманого матеріалу. Крім того, нова технологія сприяє відтворюваності та стійкості необхідної високої електропровідності, сумірних нормованих магнітної та діелектричної проникності, а час синтезу, згідно до технології, що пропонується, дорівнює однієї годині.

Навпаки, витрата часу, згідно до традиційної технології, тобто за умов застосування методу осадження, загальний час осадження, промивання, фільтрації, сушки і подрібнення готового наповнювачу займає тиждень.

Вібраційна обробка наповнювача перед операцією наповнення термоеластопластового покриття сприяє досягненню ефекту створення хімічних в'язків між молекулами полімерної в'язучої основи органічної природи і молекулами феритового оксидного наповнювача зі структурою шпінелі оберненого типу.

Полімеризаційне наповнення полімерного середовища електропровідним феритовим оксидом сприяє, таким чином, досягненню високої концентрації поглинача в полімерній матриці. Це сприяє, таким чином, досягненню потрібного високого рівня поглинань енергії поля без втрати механічної міцності поглинаючого покриття після його затвердіння.

6. Визначення засобів для економічного і повного видалення вологи без центрифуги із середовища на етапі його повного висушування

Процес реалізують параметри комплектуючих блоку теплової інтенсифікації процесу тепломасопереноса компресор 15, дросель 21, випарник 22 і конденсатор 20 у складі теплового насоса мікрохвильово-теплового обладнання. Ці параметри принципово не відрізняються від типових параметрів будь-якого теплового насоса.

Потрібна потужність компресора, технічні характеристики дроселя, випарника і конденсатора відповідно до технологічного режиму конкретного технологічного процесу забезпечують реалізацію функцій:

- вилучення вологі із повітря за допомогою попадання його на охолоджувач камери теплового насосу;
- додаткового нагрівання в оточенні конденсатора (теплового насосу), з метою подальшої інтенсифікації процесу сушіння середовища на заключному

етапі, коли середовище, що втратило більшу частину вологі та стає практично прозорим для електромагнітної хвилі;

Реалізація сукупності цих функцій є принципово необхідною. Вона, по-перше, сприяє економії енергії на важливому, заключному етапі обробки гетерогенного середовища; по-друге, забезпечують реалізацію високого рівня коефіцієнта енергетичної ефективності процесу у відповідності з циклом Карно.

В залежності від конкретних потрібних параметрів режиму тепломасопереносу на другому етапі обробки середовища, тобто на етапі сушіння, значення температури випарника T_1 і конденсатора T_2 устанавлюють з урахуванням потрібної продуктивності процесу.

Наприклад, в конденсаторі 20 цієї зони теплового насоса потрібна температура $T_1=340$ К, а у випарнику 22 температура реалізована на рівні $T_2=255$ К, тому типовий коефіцієнт перетворення енергії за допомогою теплового насоса у складі: компресора; конденсатора 20; дросельного вентиля 21 і випарника 22 становить

$$\xi = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 4. \quad (12)$$

Під час процесу мікрохвильово-теплового сушіння здійснюється прийнятний рівень відбору вологі від повітря випарником 22 за допомогою вентилятора 24 нагнітання повітря та прийнятний рівень тепловіддачі сухому повіттю від конденсатора 20 за допомогою вентилятора 25.

Ефективність інтенсифікації масопереносу, згідно до (12), показує, що в камеру 2 буде додатково поступати (для прискорення процесів в мікрохвильово-тепловій машині) 4 кВт теплової потужності на кожний 1кВт потужності. Потужність витрачається на роботу компресора 15 у блоці 18 теплової інтенсифікації процесу сушіння продукції.

8. Обговорення результатів дослідження нової технології інтенсивної мікрохвильово-тепловій обробки гетерогенних середовищ

Досягнення потрібних результатів синтезу ферит-феритового оксиду термохімічним спіканням в пічці шахтного типу за допомогою каталізатора потребує дотримання технологічних вимог його синтезу. Забезпечення умов для їх виконання сприяє продуктивному одержанню термостійкого (до 800 °С), вискодисперсного наповнювача (з електропровідністю, яка перевищує 10^3 См/м, з розміром частинок на рівні ≤ 1 мкм) зі сумірними величинами діелектричної і магнітної проникності.

Саме такі властивості наповнювача забезпечують потрібні рівні поглинання (енергії поля) покриттям перфорованої горизонтальної перегородки камери для забезпечення інтенсивної та якісної обробки гетерогенних середовищ різного призначення, наприклад: білизни, тканини, теплоізоляційних матеріалів, продукції аграрного виробництва.

Високий рівень поглинання енергії електромагнітного поля забезпечується при цьому навіть за допомогою достатньо тонкого (1–2 мм) покриття для камери, що забезпечує інтенсивний та якісний тепломасопереніс під час обробки гетерогенних середовищ.

Полімеризаційне наповнення сполучної основи органічного термостійкого полімеру на базі термоеластопласта успішно реалізується в металевому реакторі вібраційної машини з металевими шарами різного діаметра.

Механо-хімічне сплавлення частинок феритового оксиду з частинками ферит-феритового оксиду, сприяє значному збільшенню концентрації феритового наповнювача без втрати механічної міцності покриття для камери мікрохвильово-теплової машини під час обробки продукції.

Технологія узгодженого сушіння продукції за допомогою з'єднаного функціонування обладнання мікрохвильового нагріву середовищ та енергетично економічного «теплого насосу» сприяє отриманню потрібного ефекту:

- по-перше, дозволяє інтенсифікувати трудомісткий процес повного вилучення із гетерогенного середовища, яке обробляється, вільної і зв'язаної вологі;
- по-друге, сприяє зменшенню більш ніж у 4 рази витрату енергії на досушування продукції в камері 2 без центрифуги;
- по-третє, скорочує у декілька разів витрати часу для реалізації процесу миття-сушіння продукції в мікрохвильово-тепловій машині.

Таким чином, технологія сприяє більш продуктивному, економічному, екологічно безпечному процесу інтенсивної обробки різних гетерогенних середовищ, тих, що потребують високотехнологічної реалізації.

Реалізація технології інтенсивного масопереносу, тобто якісного миття-сушіння під час мікрохвильово-теплової обробки гетерогенних середовищ широкого спектра практичного призначення, потребує подальших зусиль.

Перш за все, побудова мікрохвильово-теплової машини, яка спрямована на застосування нових технологічних досягнень обробки будь-якої продукції, потребує нових конструкторських рішень, нового обладнання і оригінальних за властивостями матеріалів.

По-друге, обробка, тобто миття і сушіння до заданого рівня, середовища конкретного типу потребує ретельного теоретичного обґрунтування та експериментального відпрацювання оптимальних параметрів температурно-теплого режиму функціонування мікрохвильово-теплової машини.

По-третє, під час розвитку і впровадження у практику мікрохвильово-теплової технології, важливими також є ретельні зусилля щодо забезпечення (ще на етапі проектування) якості продукції, що повинна оброблятися за технологією, що пропонується, а також постійного контролю якості продукції на етапі відпрацювання параметрів технологічного режиму інтенсивної обробки.

9. Висновки

1. Ефективність інтенсивної та якісної обробки гетерогенних середовищ збільшується лише за допомогою виконання всіх технологічних операцій, що запропоновані та засновані на різних фізичних принципах, а саме:

- вакуумування камери для обробки середовища, з метою зменшити згасання енергії ультразвукових коливань під час миття продукції;
- ультразвукової обробки середовища, з метою інтенсифікувати процес миття компонентів середовища за рахунок кавітаційного ефекту;
- мікрохвильового рівномірного за обсягом нагріву середовища і води, з метою сприяти контрольованому за якістю миттю без миючих хімічних речовин, у випадку значного забруднення середовища;
- застосування енергії тиску атмосфери для початкового економічного вилучення брудної води та вільної вологі із середовища, що оброблюється;
- нейтралізації резонансних властивостей камері з метою інтенсифікації процесу сушіння, перш за все, вилучення зв'язаної вологі;
- застосування процесу вилучення вологі із повітря за допомогою попадання його на охолоджувач камери теплового насосу, з метою остаточного висушування продукції;
- додаткового нагрівання повітря в оточенні конденсатора теплового насосу з метою інтенсифікації процесу сушіння середовища; це необхідне на заключному етапі, коли середовище, що втратило більшу частину вологі, стає практично прозорим для електромагнітної хвилі на виході концентратора.

2. Доцільним варіантом обладнання для реалізації технології автоматизованої, якісної, мікрохвильово-теплової, інтенсивної, та екологічно безпечної обробки гетерогенних середовищ, тобто миття і сушіння продукції, є узгоджене застосування мікрохвильового нагрівача і теплового насосу. Це сприяє здійсненню технологічного процесу повного видалення вологі без центрифуги із середовища протягом етапу його сушіння.

3. Реалізація процесу інтенсивного і безпечного миття без застосування хімічних миючих засобів, без перегріву і недогріву продукції, а також без шкідливого випромінювання поля камери, забезпечується сукупністю нових блоків. До них відносяться: вакуумний насос, ультразвуковий генератор, блок концентрації енергії в обсязі середовища, термоеластопластове покриття горизонтальної перфорованої перегородки в камері.

4. Потрібними параметрами феритового невідбиваючого покриття з електропровідним поглиначем-магнетитом для наповнення термоеластопласту є: однакові за величиною відносні діелектрична і магнітна проникності; однакові значення відповідних провідностей, які нормовані відповідними проникностями повітря; сумірні рівні відповідних тангенсів кутових втрат поля, які перевищують одиницю.

Застосування технології, яка пропонується, може сприяти зменшенню енергетичних витрат на обробку гетерогенної продукції більш ніж в чотири-п'ять разів, а витрат енергії під час миття-сушіння теплоізоляційних середовищ – у вісім-десять разів.

Література

1. Pu, Y.-Y., Sun, D.-W. (2017). Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imag-

ing visualisation of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, 156, 108–119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.006>

2. Wray, D., Ramaswamy, H. S. (2015). Novel Concepts in Microwave Drying of Foods. *Drying Technology*, 33 (7), 769–783. doi: <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793>

3. Kumar, C., Joardder, M. U. H., Farrell, T. W., Millar, G. J., Karim, M. A. (2015). Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. *Drying Technology*, 34 (8), 962–973. doi: <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1087408>

4. Lundqvist, P., Öhman, H. (2017). Global Efficiency of Heat Engines and Heat Pumps with Non-Linear Boundary Conditions. *Entropy*, 19 (8), 394. doi: <https://doi.org/10.3390/e19080394>

5. Resta, I. M., Horwitz, G., Elizalde, M. L. M., Jorge, G. A., Molina, F. V., Antonel, P. S. (2013). Magnetic and Conducting Properties of Composites of Conducting Polymers and Ferrite Nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49 (8), 4598–4601. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2259582>

6. Sierociuk, D., Dzieliński, A., Sarwas, G., Petras, I., Podlubny, I., Skovranek, T. (2013). Modelling heat transfer in heterogeneous media using fractional calculus. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371 (1990), 20120146. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0146>

7. Shah, P. N., Shaqfeh, E. S. G. (2015). Heat/mass transport in shear flow over a heterogeneous surface with first-order surface-reactive domains. *Journal of Fluid Mechanics*, 782, 260–299. doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.528>

8. Chen, W., Wang, J., Zhang, B., Wu, Q., Su, X. (2017). Enhanced electromagnetic interference shielding properties of carbon fiber veil/Fe₃O₄nanoparticles/epoxy multiscale composites. *Materials Research Express*, 4 (12), 126303. doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa9af9>

9. Дем'янчук, Б. О. (2011). Метод корекції хвилевих опорів модифікованих радіозахисних композитів з гетерогенними наповнювачами. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 31, 39–45.

10. Дем'янчук, Б. О., Поліщук, В. Ю. (2007). Синтез ферромагнітних оксидов-наполнителів радіоматеріалів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 5, 61–64.

11. Дем'янчук, Б. О., Колесниченко, Н. О. (2019). Пат. № 119208 UA. Мікрохвильово-теплова машина. МПК ВО8В 3/12. опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.