

УДК 662.638/818:674.08

Зменшення розподілу температурного поля при гнучкому НВЧ сушінні рослинної сировини

Ф.В. Ківва¹, В.І. Д'яконов², О.С. Скрипник³

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

Національної академії наук України (ІРЕ НАНУ) (м. Харків, Україна), kiva@ire.kharkov.ua

² Харківській національній технічній університет сільського господарства імені Петра Василенка, (м. Харків, Україна), v.i.diakonov@gmail.com ORCID: 0000-0001-5149-685X

³ Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова (м. Харків, Україна), elenases2015@gmail.com ORCID: 0000-0001-5926-755X

Встановлено, що гнучкі можливості НВЧ технології використовуються при переробці рослинної сировини в наступних технологічних процесах: сушка, зниження мікробної контамінації (знезараження), виробництво соків і екстракції. Розповсюдження високочастотного методу нагрівання пояснюється цілим рядом його гнучких особливостей. Перш за все, при високочастотному нагріванні з'являється можливість забезпечення високих швидкостей підвищення температури в матеріалі. У статті розглянута можливість виконувати вибірково нагрів при обробці неоднорідних матеріалів, що знижує енергетичні витрати процесу в цілому. Встановлено що застосування НВЧ технологій дає можливість отримати готовий продукт більш високої якості і харчової цінності. При сушінні у зв'язку зі зменшенням коефіцієнта втрат матеріалу, що нагрівається, швидкість підняття температури автоматично знижується до кінця процесу, при цьому зменшується можливість недопустимого перегрівання продукту. Технологічні процеси з використанням швидкісного високочастотного нагріву легко механізувати і автоматизувати.

Впровадження високочастотного методу нагріву значно покращує санітарно – гігієнічні умови праці, але певним недоліком ЕМП технології брикетування є нагальна необхідність екранування ЕМП виключно в зоні взаємодії поля з речовиною та недопущення його витоків більше гранично – допустимих рівнів. При раціональному підборі частоти коливань та параметрів камер, де відбувається перетворення НВЧ – енергії в теплову, можна отримати відносно рівномірне виділення тепла по об'єму тіла.

Ключові слова: рослинна сировина, переробка, електромагнітне поле, надвисока частота, сушіння.

Вступ. Процеси сушіння рослинних відходів для надання їм необхідних фізико-технічних і експлуатаційних характеристик є досить енергоємними і тривалими. З різноманіття методу реалізації цього процесу найбільш ефективним з точки зору продуктивності, енергозбереження, екологічної чистоти, якості готового продукту є сушка енергією електромагнітного поля надвисокої частоти (НВЧ).

Мета, завдання та методика дослідження.

Метою дослідження є удосконалення існуючих НВЧ технологій переробки рослинної сировини. Для проведення досліджень використано комплекс методів наукового дослідження: порівняльний, теоретичний і статичний.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

В останні роки в Україні і за кордоном ведуться інтенсивні дослідження і розробки, спрямовані на перетворення біомаси з потенційних паливно-енергетичних ресурсів в реально використовувани і конкурентоспроможні палива [1, 2].

Відомо, що сушка рослинної сировини вимагає великих енергетичних витрат. Використання

НВЧ пристроїв дозволяє скоротити витрату енергії на обробку рослинної сировини, внаслідок скорочення часу сушки при збереженні високої якості продукції. Серед наукових напрямків дослідження процесів сушіння матеріалів слід виділити розробки відомих вітчизняних та зарубіжних наукових шкіл А.В.Ликова, П.Д. Лебедева, С.П. Рудобашти, П.Перре [3-6], яким належать фундаментальні досягнення в цій галузі. Також накопичений значний досвід в теорії і техніці СВЧ-сушіння в роботах наукових шкіл Ю.С.Архангельського, А.А. Кураєва, М.М.Гринчик, Г. Пюшнера [7-10]. Ними вперше відзначена можливість значної інтенсифікації процесу сушіння шляхом створення ефекту об'ємного нагріву і значного градієнта внутрішнього тиску пара в матеріалі за допомогою високочастотного поля, розроблені теоретичні основи створення технологічних НВЧ-камер і опромінювачів.

Проте аналіз науково-технічних публікацій показує, що процеси НВЧ-сушіння мало вивчені як в практичному, так і теоретичному відношенні.

Процес характеризується динамічністю, значними напруженнями електромагнітних полів в технологічній зоні, а також великим різноманіттям явищ внутрішнього тепло- і вологопереносу, що мають місце на стадіях обробки. Все це обумовлює складність експериментального контролю технологічних параметрів.

При теоретичному описі процесів розроблені математичні моделі не враховують всю специфіку досить складних процесів і не можуть представити повну інформацію як протікають явища.

Вивчення процесів, що мають місце в НВЧ-опромінювач і капілярно-пористих матеріалів при НВЧ-нагріванні, пов'язане з рядом труднощів, пов'язаних насамперед зі складністю або неможливістю детальних експериментальних досліджень цих процесів.

Це визначає актуальність застосування методів математичного моделювання при комплексному вивченні процесів і проектуванні пристроїв НВЧ-сушіння.

Аналіз науково-технічних публікацій, присвячених даних області, показує, що розроблені до теперішнього часу математичні моделі не змогли врахувати всю специфіку процесу, і як наслідок, уявити повну інформацію як протікають явища: в них або приділялося недостатньо уваги моделювання поширення НВЧ-хвиль в середовищах при повному підході до опису тепло- і масообмінних процесів, або, навпаки, детально формулювалася електродинамічна задача, а процесам тепловологопереносу в пористих системах приділялося мало уваги.

Результати дослідження. В даний час НВЧ-технології знаходять все більше застосування в процесах температурної обробки (сушіння) різних матеріалів з використанням полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Метою даної роботи є вибір структури НВЧ-установки для обробки протяжних виробів з препрегів полімерних композиційних матеріалів, що дозволяє найкращим чином забезпечити рівномірність температурної обробки заготовок.

Так як полімерне зв'язуюче відноситься до полярних діелектриків, то на НВЧ-частотах впливає на узагальнену поляризацію молекул.

Перевагою НВЧ-технологій є збільшення швидкості досягнення в'язкоплинного стану і стадії затвердіння ТПКМ за рахунок передачі енергії електромагнітного поля НВЧ-діапазону практично по всьому об'єму оброблюваного матеріалу без втрат. Перераховані переваги можна реалізувати в різних варіантах мікрохвильових технологічних комплексів.

Однією з вимог, що пред'являються до розподілу температури в робочій камері НВЧ-технологічної установки, є її рівномірність по всьому об'єму діелектрика. Нерівномірність

розподілу температури в діелектрику може супроводжуватися великими температурними напруженнями, пов'язаними з перегрівом деяких його частин, що в кінцевому підсумку позначається на якості НВЧ-обробки матеріалів і виробів. Найчастіше вимога рівномірності температурного поля при НВЧ-нагріванні замінюється вимогою створення і підтримки рівно амплітудного електромагнітного по всьому об'єму оброблюваного діелектрика, що в даному випадку еквівалентно вимозі рівномірного нагріву. Для отримання рівномірного НВЧ-нагрівання протяжного діелектрика скористаємося багатоелементною випромінюючою системою, розташованою над його поверхнею. В роботі [12] показано, що при вирішенні даного завдання функції:

$$T(z, y, t) = T_0 + \frac{2\alpha F_e S_0}{\lambda(4\alpha^2 + b^2)} \times \\ \times (\exp(\alpha^2(4\alpha^2 + b^2)t) - 1) \times \\ \times \exp(-2\alpha z) \sum_{i=1}^n \exp(-b|y - y_i|) \quad (1)$$

та

$$T = T_0 + \frac{2\alpha F_e S_0}{\lambda\left(4\alpha^2 - \frac{\pi^2}{4d^2}\right)} \times \\ \times \left(\exp\left(\alpha^2\left(4\alpha^2 - \frac{\pi^2}{4d^2}\right)t\right) - 1 \right) \times \\ \times \exp(-2\alpha z) \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{\pi(y - y_i)}{2d}\right), \quad (2)$$

розподілу НВЧ-впливу і-го випромінювача, розташованого над поверхнею діелектрика у точці з координатою $y = y_i$, для отримання рівномірного температурного поля в якості опції $\phi_0(y)$ можна вибрати функцію тотожне рівну одиниці на відрізьку $[y_1, y_2]$.

На рис. 1 наведені криві, що відображають залежність температури від координати y вздовж діелектрика на різній глибині, відповідні оптимізованому розподілу амплітуд порушення випромінювачів y_i . П'ять джерел електромагнітного поля розташовані симетрично щодо центрального джерела, розташованого в точці $y = 0$, на відстані 1,25 один від одного. При оптимізації були отримані наступні значення: $\gamma_1 = \gamma_5 = 0,922$, $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0,717$. На тому ж рисунку наведені криві, що відображають залежність температури від координати y вздовж діелектрика на різній глибині, відповідні одиночному джерелу, розташованого в точці $y = 0$. Для кривих 1 і 4 глибина $z = 0$, для кривих 2 і 5 – $z = 0,05$ м, а для кривих 3 і 6 – $z = 0,1$ м. Розрахунки проводилися при значеннях електрофізичних параметрів відповідних склопластику.

Наведені на рис. 1 криві показують, що, по-перше, зі збільшенням глибини нерівномірність температури зменшується (для кривої 1 величина нерівномірності температури $\delta = 0,091$, для кривої 2 – $\delta = 0,082$, а для кривої 3 – $\delta = 0,068$) і, по-друге, багатоеlementне оптимізоване збудження джерел істотно покращує рівномірність температурного поля в порівнянні з одинарним джерелом ($\delta = 0,54$ для кривої 4, $\delta = 0,46$ для кривої 5 і $\delta = 0,34$ для кривої 6). При обчисленні величини δ нерівномірності температури в якості заданої температури $T_{\text{зад}}$ використовувалася величина $0,5 (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})$.

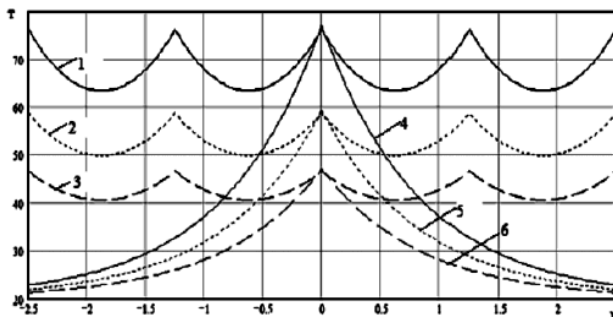


Рис. 1. Розподіл температури вздовж діелектрика щодо центрального випромінювача в точці $y = 0$

Як видно з наведених на рис. 1 результатів установка дозволяє забезпечити достатню рівномірність температурного поля, але лише уздовж діелектрика, в той час як відмінність температури на поверхні і в глибині залишається значним. Якщо поряд з оптимізацією амплітуд порушення випромінювачів уї здійснювати ще оптимізацію координат розташування джерел електромагнітного поля і вид функцій, що відбивають форму поверхневого розподілу впливу НВЧ-випромінювання, то поліпшення рівномірності температурного поля може бути ще більш значним. Однак в ряді важливих практичних випадків цього виявляється достатнім, і ця схема установки дозволяє здійснювати виготовлення виробів з ТПКМ, зокрема, протяжних плоских. Недоліком цієї схеми НВЧ-установки є ускладнення системи формування температурних і електромагнітних полів, пов'язане з необхідністю врахування взаємних зв'язків випромінювачів. Простіший спосіб полягає в застосування в якості камери обробки рупора досить великої довжини, в розкритті якого встановлюються оброблювані зразки композиційного матеріалу в стані препреги, впритул прилягає до поверхні, що відбиває.

У США запропоновано використання НВЧ енергії в процесі сушіння рослинної сировини в комбінації з іншими видами сушки [18-20]. Запатентований спосіб передбачає використання

мікрохвильової енергії для підвищення температури в сировині. Температура кипіння вологи знижується через знижений тиск в спеціальній вакуумній камері і вільна водяна пара конденсується в атмосфері зниженого тиску [19]. Встановлено, що мікрохвильове випромінювання з метою видалення вологи найкраще використовувати тільки після того, як вміст вологи в сировині вже істотно знизився під дією конвективного нагріву. Це дозволяє гнучко збільшити швидкість сушіння і підтримувати низькі температури поверхні.

У США запатентована енергозберігаюча гнучка сушарка для вологої рослинної сировини. Принцип дії сушарки полягає у використанні двигуна внутрішнього згоряння, який одночасно забезпечує конвективне сушіння сировини і приводить в дію генератор, який виробляє електрику для НВЧ пристрою. Вологий продукт подається через першу зону, в якій його сушать за допомогою конвекції, а потім через другу зону, в якій його досушують із застосуванням НВЧ-випромінювання [20].

Запатентована універсальна сушильна установка комбінованої дії, що поєднує конвективну і НВЧ сушку. Установка складається з робочої камери, завантажувального і розвантажувального пристрою, випромінювача НВЧ енергії. [21].

НВЧ-енергія використовується також для сушіння рослинної сировини і вторинних ресурсів, що утворюються при її переробці, з метою отримання порошків, харчових і біологічних активних добавок. Запатентований спосіб виробництва порошку з цукрових буряків, який передбачає термообробку подрібненого буряка НВЧ випромінюванням при температурі $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 15 хв. з подальшим диспергуванням до частинок розміром 600-1000 мкм та обробку маси інфрачервоними променями при щільності падаючого потоку променів $18,5\text{-}23,5\text{ кВт/м}^2$ з досягненням температури в центрі шару маси $85\text{-}92\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реалізація цього способу дозволяє запобігти потемнінню та знижує мікробіологічну забрудненість порошку. Недоліком способу є висока температура НВЧ-нагрівання, яка веде до карамелізації цукру, а отже до зниження якості готового продукту [22].

Відомий спосіб виробництва інстант-порошку з рослинної сировини, що передбачає сушку у полі НВЧ до залишкової вологості близько 20% при потужності поля НВЧ, що забезпечує нагрів сировини до температури $80\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ всередині шматочків протягом не менше 1 години, з подальшою досушкою конвективним методом до залишкової вологості 4-6% і подрібнення [23].

Недоліками даного способу являються тривала дія на рослинну сировину високої температури, а також необхідність здійснення додаткового досушування конвективним методом, що неминуче призведе до значної

втрати термолабільних біологічно активних речовин в процесі сушіння, а, отже, до зниження їх вмісту в висушеному продукті.

Запатентована лінія отримання порошку з ягід та іншої рослинної сировини. Порошок отримують шляхом сушки сировини в два етапи, на першому – здійснюють попереднє видалення вологи в НВЧ агрегаті при температурі 80-90 °С протягом 10-30 хвилин, а на другому етапі його досушування активним вентиляванням, що забезпечує скорочення часу сушіння [24].

Недоліком цієї лінії, є висока температура нагріву сировини в НВЧ агрегаті, а також необхідність досушування в сушарці активного вентилявання, що призведе до протікання небажаних окислювальних процесів.

Розроблено технологію виробництва та запатентовані біологічні активні добавки (БАД) до їжі, отримані з вторинних ресурсів, що утворюються при переробці фруктів і овочів [25, 26].

У патенті [25] БАД до їжі є порошок з вичавок гарбуза, отриманий шляхом їх обробки енергією НВЧ з частотою 2450 МГц при питомій потужності 450-600 Вт/дм³ протягом 40-60 секунд з метою переведення пов'язаної вологи в вільну, яка легко випаровується при подальшій сушці обробленої сировини. У патенті [26] запропоновано порошок з вичавок яблук, отриманий шляхом їх обробки енергією НВЧ з частотою 2450 МГц при питомій потужності 180-300 Вт/дм³ протягом 30-90 секунд з метою переведення пов'язаної вологи, що міститься у вичавках, у вільну, з подальшою сушкою матеріалу. Таким чином, можна зробити висновок, що застосування енергії НВЧ є найбільш ефективним на технологічній стадії підготовки рослинної сировини до сушіння, що дозволяє скоротити втрати біологічних речовин.

Запатентований [27-29] спосіб знезараження ядер грецького горіха, насіння маку, кунжуту, що передбачає їх обробку енергією НВЧ з частотою 2450 МГц при питомій потужності 300-600 Вт/дм³ на протязі 30-90 секунд, до кінцевої температури продукту 55-80 °С. Реалізація даного способу дозволяє підвищити ступінь знезараження рослинної сировини [27].

Запатентований також спосіб знезараження фруктів, який передбачає промивання сухофруктів водою і обробку їх у ЕМП. Сухофрукти з вологістю 12-25 % обробляють енергією НВЧ з частотою 2450 МГц при потужності 450 Вт/дм³ протягом 58-60 секунд до кінцевої температури продукту 75-80 °С.

Перевага запропонованого способу полягає в одностадійній обробці сухофруктів НВЧ-енергією, скорочення часу на знезараження сухофруктів [28].

Запатентований спосіб зниження мікробної контамінації (знезараження) сушених продуктів,

лікарських трав, спецій шляхом обробки їх мікрохвильовим випромінюванням, що передбачає два етапи: на першому етапі роблять нагрівання мікрохвильовим випромінюванням до температури 85-140 °С при атмосферному тиску в присутності води в дрібнодисперсному стані, а на другому етапі проводять охолодження до температури 30-50 °С за рахунок випаровування при зниженні тиску до 1-10 мм рт. ст. протягом 5 - 20 хв., вводять при цьому інертні гази. Знезараження продуктів здійснюють в радіо прозорій і повітрянопроникній тарі [30]. Енергія НВЧ використовується при виробництві соків з рослинної сировини [29, 30]. Здатність енергії НВЧ змінювати клітинну проникність рослинної сировини використовується також в процесі екстракції [30].

У Канаді запатентована технологія добування екстрагуючих речовин з такої рослинної сировини, як м'ята, хвоя, часник і т. д., що передбачає використання гнучкої НВЧ технології. [25]

У багатьох технологічних процесах з метою збільшення продуктивності, оброблюваний діелектричний матеріал з використанням енергії електромагнітного поля транспортують уздовж електродинамічної системи за допомогою конвеєра в напрямку поширення хвилі, що біжить. У таких НВЧ пристроях енергія електромагнітного поля надвисоких частот поширюється в напрямку руху оброблюваного матеріалу.

Конвеєрна сушарка MDBT (рис. 2) передбачає використання мікрохвильової енергії для підвищення температури до 230 °С. Може використовуватися для видалення води з рослинних відходів. Переваги – відсутність часу на прогрів конвеєра і швидкий розігрів матеріалу, скорочення часу і енергоспоживання в процесі сушіння або нагрівання, безперервна організація процесу і висока гомогенність нагріву.

Термообробка полімерних композиційних матеріалів на основі рослинних відходів є на сьогоднішній день одним з найбільш ефективних застосувань мікрохвильових технологій. З огляду на малу власну теплопровідність полімерних композиційних матеріалів, а також необхідність об'ємного рівномірного їх нагрівання, використання НВЧ енергії для цих цілей є найбільш ефективним способом отримання виробів належної якості. Крім того, в цьому випадку досягається суттєвий економічний ефект у порівнянні з традиційно застосовуваними технологіями нагріву [28].

Оцінка ефективності НВЧ технологічного процесу виробництва різних конструкційних матеріалів проводиться за такими параметрами: механічна міцність; час обробки; зміна мікроструктури матеріалу; температурна стійкість матеріалів; коефіцієнт корисної дії технологічного процесу; керованість процесу.

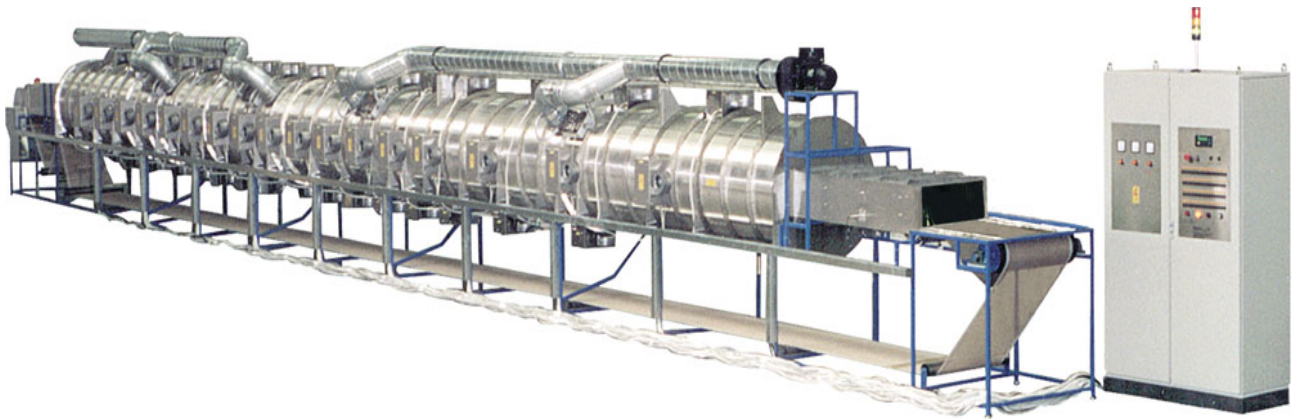


Рис. 2. Конвейерна сушарка MDBT

Особлива увага при НВЧ нагріванні приділяється малому розкиду температури в матеріалі, що в підсумку визначає внутрішню структуру і якісні характеристики одержуваних виробів, зокрема, з полімерних матеріалів, склопластику та інших матеріалів.

Висока ефективність застосування НВЧ технологій для термообробки полімерних матеріалів, зокрема полімеризація виробів зі склопластику, багато в чому обумовлена низькою теплопровідністю матеріалу і необхідністю отримання високої рівномірності нагріву по всьому об'єму матеріалу, що забезпечує повноту реакції полімеризації і максимальну міцність одержуваних виробів.

Роботи [25,26] присвячені вивченню поведінки полімерних матеріалів в НВЧ полях. У цих роботах проведена оцінка застосування НВЧ технологій для термообробки склопластиків, пошуку нових варіантів режимів нагріву полімерних матеріалів, отримання матеріалів з новими властивостями, недосяжними при застосуванні традиційних технологій.

Особливий інтерес представляє собою область застосування НВЧ енергії для отримання нових матеріалів [18]. Найбільш перспективні конструкції НВЧ пристроїв термообробки діелектричних матеріалів, що знайшли своє застосування в різних галузях промисловості описані в роботах [29, 30]

Аналіз сучасних тенденцій розвитку НВЧ технологій показує, що основні наукові дослідження спрямовані на зниження розкиду температури в матеріалах з малою теплопровідністю і збільшеними розмірами поперечних перерізів оброблюваних матеріалів по відношенню до обраної довжини хвилі джерела НВЧ енергії.

Аналіз наукових публікацій в цій області дозволяє зробити наступні висновки:

– існуючі методи розрахунку і проектування НВЧ пристроїв для термообробки матеріалів в полі біжучої хвилі не враховують залежність діелектричних властивостей матеріалу від температури і вологості. З цієї причини вибір довжини електродинамічної системи, коефіцієнта корисної дії НВЧ пристрою і величини потужності, що підводиться та коригуються в процесі експериментів, що тягне за собою збільшення часу і коштів на їх розробку;

– іозміри оброблюваного матеріалу визначаються при заданій довжині джерела НВЧ енергії параметрами електродинамічної системи і, якщо розміри об'єкта по радіусі перевищують ($0 > 0,15 \cdot \lambda$), то рівномірність нагріву матеріалу забезпечити відомими конструкціями електродинамічних систем не вдається [29, 30].

Для круглих хвилевідних систем на хвилі типу E_{01} розподіл температури по діаметру матеріалу має вигляд:

$$T(r) \sim T(0) \cdot [J_0(\gamma \cdot r)]^2 \quad (3)$$

де $T(0)$ – температура в матеріалі на осі хвилеводу.

$$\gamma^2 = k^2 \cdot \epsilon' - \beta^2 \quad (4)$$

Максимальний розкид температури по радіусу матеріалу визначається у вигляді:

$$\Delta T(r_d) \sim T(0) \cdot [1 - J_0^2(\gamma \cdot r_d)] \quad (5)$$

Для уповільнюючих систем, розподіл температури по радіусу стержня визначається:

$$T(r) \sim T(r_d) \cdot e^{-2 \cdot k \cdot k_{зам} \cdot \sqrt{1 - \frac{\epsilon'}{k_{зам}^2}} \cdot r} \quad (6)$$

де $T(r_d)$ – температура на поверхні стержня.

Максимальний розкид температури по радіусу матеріалу визначається у вигляді:

$$T(r) \sim T(r_d) \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot k \cdot k_{\text{зам}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\epsilon'}{k_{\text{зам}}^2}} \cdot r_d} \right) \quad (7)$$

На практиці досягнуто результатів рівномірного нагріву по діаметру з максимальним розкидом температури не більше 10% за умови, що значення діаметра оброблюваного матеріалу ($\phi < 0,15\lambda$). Таким чином, необхідно розробляти нові конструкції НВЧ пристроїв рівномірного нагріву матеріалів у вигляді стрижнів і труб, які мають діаметри ($\phi > 0,3\lambda$), в два рази більші значення, ніж досягнуті в даний час.

Висновки.

1. Застосування НВЧ технологій є найбільш ефективним на технологічній стадії сушки рослинної сировини.

2. Розповсюдження високочастотного методу нагрівання (формування брикета) пояснюється цілим рядом його гнучких особливостей, дешевою та технологічністю. Заміна джерела енергії виконується за декілька хвилин.

3. Перевагою НВЧ – нагріву є високий к. к. д. перетворення НВЧ – енергії в теплову, яка виділяється в об'ємі тіл, що нагріваються. Теоретичне значення цього к. к. д. близько 100 %.

4. Міцність брикетів пов'язана з малим розкидом температури в матеріалі при виготовленні не більше 10% за умови, що значення діаметра оброблюваного матеріалу ($\phi < 0,15\lambda$).

Література

1. Пат. US4015341, США, МПК А23В 9/04F26В 3/28, F26В 5/04, А23В 9/08, F26В 17/12. Процесс сушки семян [Текст] / Mc Kinney Howard F, Higginbotham Nathan L.; Заявитель и патентообладатель Mc Donnell Douglas Corporation, – № 05643507; заявл. 22.12.1975; опубл. 05.04.1977.
2. Пат. US4045639, США, МПК F26В 17/02, F26В 17/00, F26В 5/04, СВЧ и вакуумная Сушила [Текст] / Meisel Nicolas, заявитель и патентообладатель, Food Processing Systems Corporation, – № 05637420; заявл. 03.12.1975; опубл. 30.08.1977.
3. Лыков А.В. Теория сушки Текст. / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
4. Лебедев П.Д. Высокотемпературная сушка материалов под действием внутреннего градиента давлений пара Текст. / П.Д. Лебедев // Труды МЭИ. – 1958. – вып.30. – С. 169-178.
5. Рудобашта С П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов [Текст] / С.П. Рудобашта // Известия Академии наук. Энергетика. – 2000. – № 4. – С 98-109.
6. Perre, P. The Use of Numerical Simulation as a Cognitive Tool for Studying the Microwave Drying of Softwood in an Over-Sized Waveguide / Perre, P., Turner, I. W. // Wood Science and Technology, 33 (1999), 6, pp. 445-464 (PDF) Computational analy-

sis of heat and mass transfer during microwave drying of timber. Available from: https://www.researchgate.net/publication/270348437_Computational_analysis_of_heat_and_mass_transfer_during_microwave_drying_of_timber [accessed Oct 17 2018].

7. Архангельский Ю.С. Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригордый. – Саратов: Саратов. Гос. Ун-т, 2006. – 212 с.

8. Аксенчик, А.В. Мощные приборы СВЧ с дискретным взаимодействием (теория и оптимизация) / А.В. Аксенчик, А.А. Кураев. – Мн.: Бестпринт, 2003. – 376 с.

9. Гринчик, Н.Н. Влияние тепловых и диффузионных процессов на распространение электромагнитных волн в слоистых материалах / Н.Н. Гринчик, А.П. Достанко. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2005. – 149 с.

10. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Пюшнер Г. Пер с англ. – М.: Энергия, 1968. – 312 с.

11. Назаров И.В. Измерение распределения температурного поля по сечению материалов в поле бегущей СВЧ волны / М.В. Нефедов, В.Н. Нефедов, Т.А. Потапова, А.В. Мамонтов // Метрология, №3, 2006, стр.9-20.

12. Thuery J. Microwave: Industrial, Scientific and Medical Applications. Artech House Boston London, 1992. 673 p.

13. Морозов Г.А. Низкоинтенсивные микроволновые технологии. Методы и аппаратура / Г.А. Морозов и др. Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. – М.: Радио и связь, 2003. 128 с.

14. Morozov G.A. Analysis of composite material properties after microwave field processing» / G.A. Morozov, O.G. Morozov, R.R. Samigullin, A.R. Nasibullin // 45th Annual Microwave Power Symposium. 2011. New Orleans, Louisiana, USA. P. 157-162.

15. Морозов, Г.А. Микроволновая обработка терморезистивных и термопластичных полимеров / Г.А. Морозов О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Периодический теоретический и научно-практический журнал. 2011. Т. 14, № 3. С. 114.

16. Анфиногентов В.И. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. 140 с.

17. Пат. US4622757, США, МПК А23L 3/40, А23L 3/005, F26В 17/00, А23L 3/01, А23L 3/54, F26В 17/04, F26В 3/00, F26В 3/32, F26В 3/34, Генератор СВЧ – энергии для сушки пищи [Текст] / Bernstein Samuel, Ushimaru Kenji, заявитель и патентообладатель Energy International, Inc., – No 06685462; заявл. 24.12.1984; опубл. 18.11.1986.

18. Пат. ru02078522, МПК 6 А6А 23N, 6А 23В, Универсальная сушильная установка комбинированного действия, [Текст] / Громыко В.Н., Ашмарин В.А., заявитель и патентообладатель

Громыко В. Н., – No 93045184/13; заявл. 14.09.1993; опубл. 10.05.1997.

19. Пат. ru02223667, МПК 7А, 7А23L, 7А 23L, Способ производства порошка сахарной свеклы [Текст] / Корячкина С. Я. заявитель и патентообладатель Корячкина С. Я. – No 2001112882/13; заявл. 15.05.2001; опубл. 20.02.2004.

20. Пат. ru02315534, МПК А23L 3/01, Способ производства инстант-порошка из растительного сырья [Текст] / Ломачинский В.В., Мегердичев Е. Я., Квасенков О. И. заявитель и патентообладатель Ломачинский В. В., – No 2006118179/13; заявл. 29.05.2006; опубл. 27.01.2008.

21. Пат. ru02102894, МПК 6 А6А 23В Линия для получения порошка из ягод и других сырьевых растительных материалов [Текст] / Семин А.Н., Топорков Н.В., заявитель и патентообладатель, Уральская государственная Сельскохозяйственная академия, – No 96111659/13; заявл. 11.06.1996; опубл. 27.01.1998.

22. Пат. 2554991, МПК А23L 1/30, А23L 1/212, А23L 1/025, Биологически активная добавка к пище [Текст] / Лисовой В. В., Корнен Н. Н. и др., Заявитель и патентообладатель Краснодарский НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, – No 2014120105/13; заявл. 19.05.2014; опубл. 10.07.2015.

23. Пат. 2562517, МПК А23L 1/30, А23L 1/212, А23L 1/025, Биологически активная добавка к пище, [Текст] / Лисовой В. В., Корнен Н. Н. и др., заявитель и патентообладатель Краснодарский НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, – No 2014120106/13; заявл. 19.05.2014; опубл. 10.09.2015.

24. Пат. 2312505, , МПК А23В, 7/01 Способо беззараживания ядер исемян растительного сырья для использования в пищевой промышленности [Текст] / Цугленок Н. В. Цугленок Г. И. и др., заявитель и патентообладатель Красноярский государственный аграрный университет, – No 2006113812/13; заявл. 24.04.2006; опубл. 20.12.2007.

25. Пат.2248128, , МПК 7А, 7А, 23В. Способ обеззараживания сухофруктов [Текст] / Цугленок Н.В. Юсупова Г.Г. И др. Заявитель и патентообладатель Красноярский Государственный аграрный университет, No 2003122140/13; заявл. 15.07.2003; опубл. 20.03.2005.

26. Пат. 2005135281, МПК А23L3/26 Способ обеззараживания сушеных продуктов, лекарственных трав, специй [Текст] / Иванов В.А. заявитель и Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Ингредиент», – No 2005135281/13; заявл. 14.11.2005; опубл. 20.05.2007.

27. Пат. WO / 2000/001254, WO, МПК А23L 2/04, А23L 2/48, А23L 2/70. Способполучения сока израстительного сырья [Текст] / Goloveshko V., Voinov M. и др., заявитель и патентообладатель Goloveshko V., Voinov M.И др., – No PCT/UA 1998/000019; заявл. 16.12.1998; опубл. 13.01.2000.

28. Пат. 2143813, МПК 7А 23L, 7А7, А 23В, Способ безотходной переработки замороженных ягод [Текст] / Дмитриева Г.С., Кирсанов Ю.А.. заявитель и Патентообладатель ЗАО «Евдокия-Д», – No 98120720/13; заявл. 17.11.1998; опубл. 10.01.2000.

29. Пат. 0398798, EP, МПК G01, N1/44, C11, B9/02., А23L, C11В, Экстракция с помощью микроволн [Текст] / Pare Jocelyn J.R., Sigouin, MichellapointE, Jacques, заявитель и Патентообладатель Her majesty the queen in right of canada – No 90401290; заявл.15.05.1990; опубл. 22.11.1990.

30. Пат. 1546194, Китай, МПК В01D 11/02, В01J 19/12, Экстракция с помощью СВЧ [Текст] / Tang Huazhao, заявители патентообладатель Guizhou Jiacheng Pharmaceutical Co., Ltd, – No 200310111183.6; заявл. 12.12.2003; опубл. 17.11.2004.

References

1. Pat. US4015341, CShA, МПК А23В 9/04 F26B 3/28, F26B 5/04, А23В 9/08, F26B 17/12. Protsess sushky semian [Tekst] / Mc Kinney Howard F, Higginbotham Nathan L.; Zaiavytel y patentoobladelatel Mc Donnell Douglas Corporation, – No 05643507; zaiavl. 22.12.1975; opubl. 05.04.1977.

2. Pat. US4045639, CShA, МПК F26B 17/02, F26B 17/00, F26B 5/04, SVCh y vakuumnaia Sushyla [Tekst]/ Meisel Nicolas, zaiavytel y patentoobladelatel, Food Processing Systems Corporation, – No 05637420; zaiavl. 03.12.1975; opubl. 30.08.1977.

3. Lykov A.V. Teoryia sushky Tekst. / A.V. Lykov. – M.: EHnerhyia, 1968. – 471 s.

4. Lebedev P.D. Vysokotemperaturnaia sushka materyalov pod deistvyem vnutrenneho hradyenta davlenyi para Tekst. / P.D. Lebedev // Trudy MElY. – 1958. – vyp.ZO.- S. 169-178.

5. Rudobashta S P . Matematycheskoe modelirovanye protsessa sushky dyspersnykh materyalov Tekst. / SP. Rudobashta // Yzvestiya Akademyy nauk. EHnerhetyka. – 2000. – № 4. – S 98-109.

6. Perre, P. The Use of Numerical Simulation as a Cognitive Tool for Studying the Microwave Drying of Softwood in an Over-Sized Waveguide / Perre, P., Turner, I. W. // Wood Science and Technology, 33 (1999), 6, pp. 445-464 (PDF) Computational analysis of heat and mass transfer during microwave drying of timber. Available from: https://www.researchgate.net/publication/270348437_Computational_analysis_of_heat_and_mass_transfer_during_microwave_drying_of_timber [accessed Oct 17 2018].

7. Arkhanhelskyi Yu.S. Kompiuternoe modelirovanye SVCh ehlektrotermicheskykh protsessov y ustanovok / Yu.S. Arkhanhelskyi, S.V. Tryhordyi. – Saratov: Sarat. Hos. Un-t, 2006. – 212 s.

8. Aksenychuk, A.V. Moshchnye prybory SVCh s dyskretnym vzaymodeistviem (teoriya y optymizatsiya) / A.V. Aksenychuk, A.A. Kuraev. – Mn.: Bestprint, 2003. – 376 s.

9. Hrynchuk, N.N. Vlianye teplovykh y dyffuzyonnykh protsessov na rasprostraneniye ehlektromahnytnykh voln v sloystykh materialakh / N.N. Hrynchuk, A.P. Dostanko. – Mn.: Yn-t teplo- y massoobmena ym. A.V. Lykova NAN Belarusy, 2005. – 149 s.

10. Piushner H. Nahrev ehnerhyei sverkhvysokyykh chastot / Piushner H. Per s anhl. – M.: EHnerhyia, 1968. – 312 s.

11. Nazarov Y.V. Yzmereniye raspredeleniya temperaturnoho polia po secheniyu materialov v pole behushchei SVCh volny / M.V. Nefedov, V.N. Nefedov, T.A. Potapova, A.V. Mamontov // Metrolohya, №3, 2006, str.9-20.

12. Thuery J. Microwave: Industrial, Scientific and Medical Applications. Artech House Boston London, 1992. 673 p.

13. Morozov H.A. Nyzkointensyvnye mykrovolnovye tekhnolohyy. Metody y apparatura / H.A. Morozov y dr. Pod red. H.A. Morozova y Yu.E. Sedelnikova. –M.: Radyo y sviaz, 2003. 128 s.

14. Morozov G.A. Analysis of composite material proper-ties after microwave field processing» / G.A. Morozov, O.G. Morozov, R.R. Samigullin, A.R. Nasibullin // 45th Annual Microwave Power Symposium. 2011. New Orleans, Louisiana, USA. P. 157-162.

15. Morozov, H.A. Mykrovolnovaia obrabotka termoreaktyvnykh y termoplastychnykh polymerov / H.A. Morozov O.H. Morozov, A.R. Nasybullyn, R.R. Samy-hullyn // Fyzyka volnovykh protsessov y radyotekhnicheskyye systemy. Peryodycheskyi teoretycheskyi y nauchno-praktycheskyi zhurnal. 2011. T. 14, № 3. S. 114.

16. Anfynohentov V.Y. Matematycheskoe modelirovaniye SVCh nahreva dyehlektrykov. – Kazan: Yzd-vo Kazan. hos. tekhn. un-ta, 2006. 140 s.

17. Pat. US4622757, CShA, MPK A23L 3/40, A23L 3/005, F26B 17/00, A23L 3/01, A23L 3/54, F26B 17/04, F26B 3/00, F26B 3/32, F26B 3/34, Henerator SVCh– ehnerhyi dlia sushky pyshchy [Tekst] / Bernstein Samuel, Ushimaru Kenji, zaiavytel y patentoobladatel Energy International, Inc., – No 06685462; zaiavl. 24.12.1984; opubl. 18.11.1986.

18. Pat. ru02078522, MPK 6 A6A 23N, 6A 23B, Unyversalnaia sushylnaia ustanovka kombynyrovannoho deistviya [Tekst] / Hromyko V.N., Ashmaryn V.A., zaiavytel y patentoobladatel Hromyko V.N., – No 93045184/13; zaiavl. 14.09.1993; opubl. 10.05.1997.

19. Pat. ru02223667, MPK 7A, 7A23L, 7A 23L, Sposob proyzvodstva poroshka sakharnoi svekly [Tekst]/ Koriachkyna S. Ya. zaiavytel y patentoobladatel Koriachkyna S. Ya.- No 2001112882/13; zaiavl.15.05.2001; opubl. 20.02.2004.

20. Pat. ru02315534, MPK A23L 3/01, Sposob proyzvodstva yntant-poroshka yz rastytelnogo syria [Tekst] / Lomachynskiy V.V., Meherdychev E.Ya., Kvasenkov O.Y. zaiavytel y patentoobladatel Lomachynskiy V.V., – No 2006118179/13; zaiavl. 29.05.2006; opubl. 27.01.2008.

21. Pat. ru02102894, MPK 6 A6A 23B Lynyia dlia polucheniya poroshka yz yahod y druhykh syrevykh rastytelnykh materialov [Tekst] / Semyn A.N., Toporkov N.V., zaiavytel y patentoobladatel, Uralskaia hosudarstvennaia Selskokhoziaistvennaia akademyia, – No 96111659/13; zaiavl. 11.06.1996; opubl. 27.01.1998.

22. Pat. 2554991, MPK A23L 1/30, A23L 1/212, A23L 1/025, Byolohycheskyi aktyvnaia dobavka k pyshche [Tekst] / Lysovoi V. V., Kornen N. N. y dr., Zaiavytel y patentoobladatel Krasnodarskiy NYY khra-neniya y pererabotky selskokhoziaistvennoi produktsyy, – No 2014120105/13; zaiavl. 19.05.2014; opubl. 10.07.2015.

23. Pat. 2562517, MPK A23L 1/30, A23L 1/212, A23L 1/025, Byolohycheskyi aktyvnaia dobavka k pyshche [Tekst] / Lysovoi V. V., Kornen N. N. y dr., zaiavytel y patentoobladatel Krasnodarskiy NYY khra-neniya y pererabotky selskokhoziaistvennoi produktsyy, – No 2014120106/13; zaiavl. 19.05.2014; opubl. 10.09.2015.

24. Pat. 2312505, MPK A23B, 7/01 Sposobo bezzarazhyvaniya yader ysemian rastytelnogo syria dlia yspolzovaniya v pyshchevoi promyshlennosti [Tekst] / Tsuhlenok N.V. Tsuhlenok H.Y. y dr., zaiavytel y patentoobladatel Krasnodarskiy hosudarstvennyi ahrarnyi unyversytet, – No 2006113812/13; zaiavl. 24.04.2006; opubl. 20.12.2007.

25. Pat.2248128, MPK 7A, 7A, 23B. Sposob obezzarazhyvaniya sukhofruktov [Tekst] / Tsuhlenok N.V. Yusupova H. H. y dr. Zaiavytel y patentoobladatel Krasnoarskiy Hosudarstvennyi ahrarnyi unyversytet, No 2003122140/13; zaiavl. 15.07.2003; opubl. 20.03.2005.

26. Pat. 2005135281, MPK A23L3/26 Sposob obezzarazhyvaniya sushenykh produktov, lekarstvennykh trav, spetsyi [Tekst] / Yvanov V.A. zaiavytel y Patentoobladatel Obshchestvo s ohranichennoi otvetstvennostiu «Ynhredyent», – No 2005135281/13; zaiavl. 14.11.2005; opubl. 20.05.2007.

27. Pat. WO / 2000/001254, WO, MPK A23L 2/04, A23L 2/48, A23L 2/70. Sposobpolucheniya soka yzrastytelnogo syria [Tekst] / Goloveshko V., Voinov M. ydr., zaiavytel y Patentoobladatel Goloveshko V., Voinov M. Y dr., – No PCT/UA 1998/000019; zaiavl. 16.12.1998; opubl. 13.01.2000.

28. Pat. 2143813, MPK 7A 23L, 7A7, A 23B, Sposob bezotkhodnoi pererabotky zamorozhenniakh yahod [Tekst] / Dmytryeva H.S., Kyrsanov Yu.A.. zaiavytel y Patentoobladatel ZAO «Evdokya-D», – No 98120720/13; zaiavl. 17.11.1998; opubl. 10.01.2000.

29. Pat. 0398798, EP, MPK G01, N1/44, C11, B9/02., A23L, C11B, EHkstraktsiya s pomoshchiu mykrovoln [Tekst]/ Pare Jocelyn J.R., Sigouin, MichellapointE, Jacques, zaiavytel y Patentoobladatel Her majesty the queen in right of canada – No 90401290; zaiavl.15.05.1990; opubl. 22.11.1990.

30. Pat. 1546194, Kytai, MPK B01D 11/02, B01J 19/12, Ekhstraktsiya s pomoshchiu SVCh [Tekst] / Tang Huazhao, zaiavytely patentoobladatel Guizhou Jiacheng Pharmaceutical Co., Ltd, – No 20031011 1183.6; zaiavl. 12.12.2003; opubl. 17.11.2004.

Аннотация

**Уменьшение распределения температурного поля
при гибкой СВЧ сушке растительного сырья**

Ф.В. Кивва, В.И. Дьяконов, А.С. Скрипник

Установлено, что гибкие возможности СВЧ технологии используются при переработке растительного сырья в следующих технологических процессах: сушка, снижение микробной контаминации (обеззараживания), производство соков и экстракции. Распространение высокочастотного метода нагрева объясняется целым рядом его гибких особенностей. Прежде всего, при высокочастотном нагреве появляется возможность обеспечения высоких скоростей повышения температуры в материале. В статье рассмотрена возможность выполнять выборочный нагрев при обработке неоднородных материалов, снижает энергетические затраты процесса в целом. Установлено, что применение СВЧ технологий дает возможность получить готовый продукт более высокого качества и пищевой ценности. При сушке в связи с уменьшением коэффициента потерь материала нагревается, скорость поднятия температуры автоматически снижается до конца процесса, при этом уменьшается возможность недопустимого перегрева продукта. Технологические процессы с использованием скоростного высокочастотного нагрева легко механизировать и автоматизировать.

Внедрение высокочастотного метода нагрева значительно улучшает санитарно – гигиенические условия труда, но определенным недостатком ЭМП технологии брикетирования является настоятельная необходимость экранирования ЭМП исключительно в зоне взаимодействия поля с веществом и недопущения его утечки больше предельно – допустимых уровней. При рациональном подборе частоты колебаний и параметров камер, где происходит преобразование СВЧ – энергии в тепловую, можно получить относительно равномерное выделение тепла по объему тела.

Ключевые слова: *растительное сырье, переработка, электромагнитное поле, сверхвысокая частота, сушка.*

Abstract

**Reduction of the distribution of the temperature field
at flexible microwave drying of plant raw materials**

F.V. Kivva, V.I. Dyakonov, A.S. Skrypnyk

It has been established that the flexible possibilities of microwave technology are used in the processing of plant materials in the following technological processes: drying, reduction of microbial contamination (disinfection), production of juices and extraction. The spread of the high-frequency method of heating is explained by a number of its flexible features. First of all, with high-frequency heating, it becomes possible to ensure high rates of temperature increase in the material. The article discusses the ability to perform selective heating when processing inhomogeneous materials, reduces the energy costs of the process as a whole. It is established that the use of microwave technology makes it possible to obtain a finished product of higher quality and nutritional value. When drying due to a decrease in the loss factor of the material is heated, the rate of temperature rise automatically decreases until the end of the process, while reducing the possibility of unacceptable overheating of the product. Technological processes using high-speed high-frequency heating are easy to mechanize and automate.

The introduction of the high-frequency method of heating significantly improves sanitary and hygienic working conditions, but a certain disadvantage of the EMF briquetting technology is the urgent need to shield the EMF only in the zone of interaction between the field and the substance and prevent its leakage beyond the maximum permissible levels. With rational selection of the frequency of oscillations and parameters of the chambers, where the conversion of microwave energy into heat takes place, it is possible to obtain a relatively uniform heat release throughout the body.

Keywords: *vegetable raw materials, processing, electromagnetic field, ultra-high frequency, drying.*

Представлено від редакції: О.І. Завгородній / Presented on editorial: O.I. Zavhorodnii

Рецензент: В.Ф.Харченко / Reviewer: V.F. Kharchenko

Подано до редакції / Received: 21.12.2018