

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики НАН України

**Енергоефективні тепломасообмінні процеси
при сушінні комбінованих функціональних матеріалів**

РЕФЕРАТ

Автори:

Самойленко Катерина Миколаївна, к.т.н., старший науковий співробітник
Інституту технічної теплофізики НАН України

Слободянюк Катерина Сергіївна, к.т.н., науковий співробітник Інституту
технічної теплофізики НАН України

Київ – 2021

Вступ

Україні, яка відноситься до країн з обмеженими власними енергоресурсами та імпортує близько 90 % рідких і газоподібних енергоносіїв, притаманна надмірна енергоємність основних галузей промисловості (металургії, хімії, машинобудування, переробного та агропромислового комплексу, буд-індустрії та комунального господарства).

На процеси сушіння в світі витрачається 10-12% всієї енергії. В Україні, за нашими підрахунками, на ці процеси витрачається 25% всієї енергії, а в самому лише агропромислового комплексу – 15%. При цьому випаровується до 5 млн. т вологи, яка відноситься до парникових газів, в оточуюче середовище.

На сучасному етапі розвитку процесів сушіння в Україні та світі постала нагальна потреба в створенні та розробці високоефективних теплотехнологій, які б забезпечували мінімальні витрати енергії та високу якість матеріалу.

В Україні основними галузями промисловості, які широко використовують процеси сушіння є будівельних матеріалів, агропромисловий комплекс, паливні та дерево-переробні сектори.

В процесах сушіння визначальними є процеси тепло- та масообміну. Від їхньої інтенсивності залежать ефективність сушіння та економічність використання матеріальних і енергетичних ресурсів. Тепломасообмін – дисципліна, яка вивчає закономірності процесів теплообміну, що супроводжуються переносом речовини, тобто масообміном. До технологій, в основі яких лежать тепломасообмінні процеси відноситься сушіння.

Виконаний аналіз стану і шляхів підвищення ефективності процесу конвективного сушіння показав, що в тепловому балансі процесу сушіння 40% енергії втрачається на випаровування вологи, що є показником ефективності сушарок. Основними проблемами при використанні методу конвективного сушіння є: значні втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом; низька інтенсивність процесу волого-видалення при використанні невисоких температур сушіння; залежність ефективності роботи сушарки від вологості

атмосферного повітря. Вирішення цих проблем пропонуються через: утилізацію теплоти, яка йде з відпрацьованим сушильним агентом; примусова осушка сушильного агента з метою інтенсифікації масообміну; керовані умови процесу зневоднення.

Сучасне суспільство зіткнулось із такими проблемами 21 століття як пандемія, екологічна криза, викиди парникових газів тощо. Тому, стає надзвичайно важливим функціональне харчування людей, яке неможливе без правильної технологічної переробки. Враховуючи загальну тенденцію енергоспоживання, яка веде до збільшення кількості спожитої енергії в всьому світі, вартість цієї енергії безперервно підвищується та зростає її дефіцит. Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення витрат енергоносіїв та максимальне збереження основних інгредієнтів сировини. Особливо це актуально для забезпечення населення продуктами харчування, оскільки додаткова складність в тому, що виробництво та переробка сільськогосподарської сировини відбувається в умовах підвищеного споживання газу та інших енергоносіїв з низьким к.к.д. і великими втратами сировини при переробці. Підвищення енергоефективності процесу сушіння комбінованої функціональної сировини (функціональної рослинна сировина відноситься до термолабільних колоїдних капілярно-пористих матеріалів) в комплексі може позитивно вплинути на економіку. Функціональні продукти отримані методом сушіння, підсилять суспільний імунітет.

Метою роботи є теоретичне та експериментальне обґрунтування підвищення енергоефективності тепломасообмінних процесів при сушінні, з подальшою розробкою енергоефективних теплотехнологій переробки комбінованих функціональних матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів роботи

- *вперше* досліджено вплив органічних кислот рослинної сировини на клітинну оболонку столового буряка, що дозволило зберегти бетанін в кінцевому продукті та знизити енерговитрати на процес;

- удосконалено спосіб підготовки фітоестрогенної сировини до зневоднення, який інактивує антихарчові компоненти сої та інтенсифікує процес сушіння;
- визначені параметри режиму зневоднення, які максимально зберігають біологічно активні речовини у комбінованих функціональних матеріалах;
- сформульовано основні положення фізичної та математичної чисельної моделі тепломасопереносу при конвективному сушінні функціональних матеріалів;
- *вперше* отримано зменшення теплоти випаровування води з антиоксидантної рослинної сировини за рахунок попередньої підготовки до сушіння;
- *вперше* визначені фактичні дані питомої теплоти випаровування фітоестрогенної рослинної сировини;
- встановлено, що в процесі зневоднення фітоестрогенної рослинної суміші відбувається реакція жирів з жиророзчинними каротиноїдами, яка вплинула на питому теплоту випаровування води із матеріалу;
- *вперше* визначено способи підвищення термостійкості комбінованих функціональних матеріалів.

Зміст роботи

Розроблено наукові засади підвищення енергоефективності тепломасообмінних процесів при сушінні комбінованих функціональних матеріалів. Зокрема, розроблено енергоефективну попередню підготовку сировини до сушіння. Розроблено комбіновані функціональні матеріали, а саме антиоксидантні на основі столового буряку та фітоестрогенні на основі сої. Вперше досліджено вплив органічних кислот рослинної сировини на клітинну оболонку столового буряку, що дало можливість розробити енергоефективну підготовку антиоксидантної композиції на основі столового буряку з різними компонентами до сушіння, а саме знизити енергозатрати на 85 % на цьому етапі. Удосконалена попередня підготовка фітоестрогенної сировини до сушіння дала можливість зменшити енерговитрати на цьому етапі на 20-25%. А

також, вдалося отримати високі результати збереження біологічно активних речовин комбінованих функціональних матеріалів. Наприклад, бетанін антиоксидантної сировини на основі столового буряку збережено на 95 %. А удосконалена попередня гідротермічна обробка дозволила інактивувати антихарчові компоненти фітоестрогенної сировини на основі сої.

Теоретично та експериментально досліджено кінетику процесу конвективного сушіння комбінованої функціональної сировини. Розроблена фітоестрогенна рослинна суміш із сої та шпинату інтенсифікує процес сушіння шпинату на 10% і сої на 41%. Розроблено: енергоефективні параметри режимів сушіння, при яких відбувається інтенсифікація процесу на 50 % при максимальному збереженні бетаніну 95 % для антиоксидантної сировини, а також інтенсифікація процесу на 21 % без підвищення кислотного числа для фітоестрогенної сировини. Визначено водоутримуючу здатність фітоестрогенних сумішей. Встановлено критичний параметр температури теплоносія, яка впливає на підвищення кислотного числа фітоестрогенної сировини.

Дериватографічним методом була досліджена одна з важливих характеристик – термостійкість комбінованих функціональних матеріалів. Вперше було доведено, що термічна стійкість буряково-ревеневої композиції вища за термічну стійкість складових компонентів окремо та настає пізніше, ніж у моносировині. Питомі витрати теплоти при зневодненні комбінованих функціональних матеріалів мають значно меншу величину в порівнянні з витратами на зневоднення окремих компонентів суміші.

Встановлено, що в процесі зневоднення фітоестрогенної рослинної суміші відбувається реакція жирів з жиророзчинними каротиноїдами, яка вплинула на питому теплоту випаровування вологи із матеріалу.

Виконано чисельне моделювання тепломасообмінних процесів в колоїдних капілярно-пористих матеріалах (функціональної сировини). Порівняння результатів чисельного моделювання з даними розрахунків показало їх задовільне узгодження. З аналізу даних чисельного моделювання, а також за

результатами порівняння розрахункових даних з даними експерименту встановлено, запропонована чисельна модель максимально наближено описує процес конвекційного сушіння подрібненої сої та столового буряку і може бути використана для розрахунку режимних параметрів процесу сушіння.

Бетанін столового буряка деградує під дією світла, температури, кисню. В сучасних технологіях переробки столового буряка втрачається близько 40-60 % бетаніну. Досліджено залежність збереження бетаніну від температури теплоносія в буряці необробленому, гіротермічно обробленому, буряково-речених та буряково-томатних композиціях. При сушінні непідготовленого буряку бетанін зберігається на рівні 40 %. При температурі теплоносія 40-50 °С та високому вологовмісту навіть гіротермічно оброблений столовий буряк псується, а бетанін зберігається лише на 40-50 %. При температурі теплоносія 70-80 °С - зберігається близько 70 % бетаніну. Максимальне значення збереження бетаніну 96,5 % відповідає режиму сушіння 60 °С та створеним композиціям.

Фітоестрогенні порошки мають високий вміст ліпідів. В них достатньо високий вміст ω -3 лінолевої кислоти. Вони чутливі до окислення з утворенням вторинних продуктів, які надають порошкам небажаний смак і аромат. Для запобігання цих проблем використовують природні стабілізатори такі як каротиноїди. Дослідження якості функціональних порошків при зберіганні, на основі високо жирових рослинних компонентів, проводились за допомогою визначення кислотного числа. При зберіганні монопорошків через три місяці кислотне число вище норми (4 %), тоді як у комбінованих становить всього 1,5 %.

При дослідженні якісних характеристик рослинної сировини до та після сушіння, було доведено, що комбіновані функціональні порошки мають довший термін зберігання, ніж монопорошки.

Розроблено енергоефективну теплотехнологію переробки комбінованих функціональних матеріалів. Зокрема, розроблено енергоефективну теплотехнологію отримання антиоксидантних порошків. Знижено енергетичні

витрати на стадії підготовки антиоксидантної сировини та її сушіння на 85 % і 50% відповідно.

Розроблено інноваційну енергоефективну теплотехнологію отримання фітоестрогенного порошку на основі сої зі шпинатом. Знижено енергетичні витрати на стадії підготовки фітоестрогенної сировини та її сушіння на 20-25 % і 21 % відповідно.

Практичне значимість роботи

В результаті експериментального та теоретичного дослідження процесу тепломасообміну зневоднення комбінованих функціональних матеріалів з урахуванням властивостей матеріалу та режимів сушіння **розроблено** інноваційні теплотехнології та підібрано обладнання для отримання комбінованих функціональних порошків (антиоксидантних на основі столового буряка та фітоестрогенних на основі соєвих бобів), які **захищені 4 Патентами України на Винахід: № 102358** Спосіб одержання буряково-лимонного антиоксидантного барвника; **№ 109083** Лінія для виробництва композиційних антиоксидантних порошків з рослинної сировини; **№ 115741** «Спосіб одержання фітоестрогенного порошку з сої та шпинату»; **№ 120145** «Спосіб одержання соєво-бататного функціонального порошку».

Розроблено і затверджено нормативну документацію на виробництво нових видів антиоксидантних харчових порошків, яка була узгоджена з МОЗ України, пройшла державну перевірку і була зареєстрована ДП «Укрметртестстандарт» «Порошки антиоксидантні з рослинної сировини» ТУ У 10.3-05417118-045:2012).

Впроваджено (3 Акти впровадження):

1) у 2018 році на ТОВ «Їжа майбутнього»: *модернізовано* сушильну установку на тепловому насосі; *впроваджено* енергоефективні режими сушіння комбінованих функціональних матеріалів на модернізованій сушильній установці з тепловим насосом.

2) у 2019 році на СПД «Everyday food» *впроваджено* технологію отримання і обладнання (сушильної установки на тепловому насосі) по переробці харчової сировини на сушену продукцію та порошки.

Очікуваний загальний річний *економічний ефект* від впровадження теплотехнології та обладнання однієї лінії отримання функціональних порошоків складає 1075831 грн. при **терміні окупності** 1,07 року. Впровадження по одній лінії в кожній області України дасть фактичний економічний ефект біля 20 млн. грн.

Проведений аналіз співвідношення витрат на виготовлення порошку з комбінованих функціональних матеріалів показав, що основні витрати припадають на сировину - 41,7%, заробітну платню - 30,5% та енергетичні - 15,4%.

Висновки

Вперше досліджено вплив органічних кислот рослинної сировини на клітинну оболонку столового буряка, що дало можливість розробити енергоефективну підготовку антиоксидантної композиції на основі столового буряку з різними компонентами до сушіння, а саме знизити енергозатрати на 85 % на цьому етапі.

2. Удосконалена попередня підготовка фітоестрогенної сировини до сушіння дала можливість зменшити енерговитрати на цьому етапі на 20-25 %.

3. Розроблено енергоефективні режими сушіння: антиоксидантної сировини, при якому відбувається інтенсифікація процесу на 50 % при максимальному збереженні бетаніну 95 % для антиоксидантної сировини, а також інтенсифікація процесу на 21 % без критичних змін величини кислотного числа для фітоестрогенної сировини.

4. Сформульовано основні положення фізичної та математичної чисельної моделі тепломасообмінних процесів під час сушіння функціональної сировини. Порівняння результатів чисельного моделювання з даними розрахунків показало їх задовільне узгодження. З аналізу результатів чисельного моделювання, а також за результатами порівняння розрахунків з даними

експерименту встановлено, що запропонована чисельна модель максимально наближено описує процес конвективного сушіння антиоксидантної та фітоестрогенної сировини і може бути використана для розрахунку режимних параметрів процесу сушіння.

5. Вперше дериватографічними дослідженнями доведено, що термічна стійкість антиоксидантної композиції вища за термічну стійкість складових компонентів. Середня питома теплота зневоднення суміші на 13,5 % нижча за теплоту зневоднення столового буряку і майже на 9% менша теплоти зневоднення ревеню.

Вперше в результаті калориметричних досліджень встановлено, що теплота випаровування води в антиоксидантній сировині менша, ніж вихідних компонентів.

7. Вперше встановлено питому теплоту випаровування води з фітоестрогенної суміші. В результаті створення комбінованого продукту під час сушіння зареєстровано інтегральний тепловий ефект в процесі випаровування – реакція жирів з жиророзчинними каротиноїдами, яка вплинула на питому теплоту випаровування води із матеріалу.

8. Визначено водоутримуючу здатність сухих порошкоподібних комбінованих функціональних матеріалів. Встановлено, що отриманий продукт відновлюється в 2 рази швидше за еталон.

9. Розроблено ресурсоенергозберігаючі теплотехнології та технологічні лінії для отримання комбінованих функціональних порошків, які захищені 4 Патентами України на Винахід.

10. Очікуваний загальний річний економічний ефект від впровадження теплотехнології та однієї технологічної лінії для отримання функціональних порошків складає 1075831 грн. при терміні окупності 1,07 року.

Впровадження розробленої теплотехнології та технологічної лінії в кожній області України дасть фактичний економічний ефект біля 20 млн. грн.

Кількість публікацій за роботою: 64, включаючи 1 монографію та 1 колективну монографію, 24 наукових статей, у т.ч. 2 публікації у Scopus, 1 - у Web of Science. Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи: Google Scholar – 20/3, Scopus – 2/0, Web of Science – 1/0. Отримано 4 патенти України на винахід; 1 ТУ України та висновок МОЗ про функціональність продукту. Захищено 2 кандидатських дисертацій.

_____Самойленко К.М.

_____Слободянюк К.С.