

ОСНОВНІ ПІДХОДИ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ТЕПЛОТИ І МАСИ ПРИ СУШІННІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Ощипок І. М. д-р техн. наук, професор

Львівський національний університет ім. І. Франка, м. Львів

Анотація. В статті розвинута термовологомеханіка сушіння харчових продуктів на основі систем диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу та описані різні аналогічні процеси. Розглянута задача покращення процесу теплового сушіння продуктів у примусовому режимі, яка полягає у визначенні співвідношень між параметрами процесу: температурою сушильного агента на кожній ступені, часом витримки, початковою температурою сушіння і початковою, і кінцевою вологістю продукту, які дозволять без зниження якості готового продукту провести процес з мінімальним сумарним часом сушіння при мінімальних енергозатратах. Побудовані ізотерми адсорбції та десорбції води в харчових продуктах, які залежать від вмісту води і температури. Показана крива десорбції, яка розділена на 3 зони. Зона 1 ($0 \leq 0,2$): характеризується утворенням молекулярного моношару на поверхні продукту (сили Ван-дер-Ваальса між гідрофільними групами та молекулами води). Зона 2 ($0,2 \leq 0,6$): Адсорбція молекул водню відбувається на вихідному моношарі або включенням молекул води капілярним шляхом. Зона 3 ($> 0,6$): вода, присутня в рідкому стані в порах матеріалу. Мікрокапілярна вода є безперервною фазою. Дана оцінка застосування моделі дифузійної теорії для біологічних матеріалів, які регулюються рівнянням дифузії. Досліджено в даному контексті положення теорії капілярності в якій потік вологи визначається капілярними силами, а не градієнтом концентрації вологи. На основі випаровувально-конденсаційної теорії випаровування і конденсації розглянули як сполучний механізм перенесення маси та внутрішньої теплоти, де маса переходить у пароподібний стан, а теплота обмінюється з середовищем шляхом конденсації пари або випаровування води. Показані механізми перенесення вологи всередині харчових продуктів у формі твердого тіла.

Ключові слова: сушіння, волога, харчовий продукт, ізотерма, адсорбція, десорбція, модель

Формулювання проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями Сушіння є складною операцією, що включає одночасно явище перенесення теплоти і маси, а також фізичні або хімічні перетворення, які можуть викликати зміни якості харчової продукції. Фізичні зміни, які відбуваються включають геометричні зміни (усадку), набухання, кристалізацію та інші фазові переходи. У деяких випадках хімічні або біохімічні реакції можуть бути потрібними або небажаними, що призводить до зміни кольору, текстури, запаху або інших властивостей харчового виробу. При виробництві харчової продукції каталізаторами, наприклад, можуть стати умови сушіння, які викликають значні зміни в їх активності шляхом зміни внутрішньої площі поверхні або пористості.

Чим більша різниця температур між теплоносієм і продуктом, тим більшою буде швидкість передачі теплоти в продукт; це забезпечить необхідну рушійну силу для видалення вологи. Коли теплоносієм є повітря, температура відіграє іншу важливу роль. Оскільки вода виділяється з харчових продуктів у вигляді водяної пари, її потрібно відвести, в іншому випадку вона створює вологу насичену пару на поверхні харчового продукту, яка сповільнює швидкість подальшого видалення води. Чим гарячіше повітря, тим більше вологи воно утримуватиме, перш ніж відбудеться насичення. Очевидно, і те що більший об'єм повітря також може поглинати більше вологи, ніж менший об'єм. Нагріте повітря не тільки поглинає більше вологи, ніж прохолодне, але й процес його видалення залежить від швидкості руху, тобто повітря з достатньою швидкістю, усуває її з поверхні продукту, що висушується, не даючи волозі створити насичену водяну пару.

Волога вільно видаляється з поверхні, якщо тиск її пари перевищує тиск атмосферної пари над нею. Але в міру висихання сировини і поступового видалення вільної вологи тиск пари з одиниці площі продукту зменшується. Тому, що не тільки залишається менше води на одиницю об'єму та на одиницю площі, а ще й тому, що частина води утримується або зв'язується хімічними та фізичними силами з твердими складовими продукту.

Вільну вологу найлегше видалити, вона першою випаровується. Додаткова вода може нещільно утримуватися силами адсорбції твердих речовин продукту. Важче видалити воду, яка утворює колоїдні гелі, наприклад, коли присутні крохмаль, пектин або інші в'язучі. Ще складніше видалити хімічно зв'язану воду у вигляді гідратів (наприклад, моногідрату глюкози або гідратів неорганічних солей). Ці явища також сприяють вирівнюванню нормальних кривих висихання продукту з часом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вологості харчової сировини при висушуванні має дуже важливе значення. Теорія деформації у вологих та ненасичених пористих середовищах була розвинена у роботі [1]. Подальший розвиток теорії з урахуванням багатозфазного транспортування вологи з використанням опису сумішей виконано в різних дослідженнях (огляд у роботі [6]). Можливий опис процесу в мік-

ромасштабі або з урахуванням усереднення макромасштабу [8]. В обох підходах базові співвідношення описуються як на основі дослідних даних, так і на основі другого закону термодинаміки через нерівність ентропії (нерівноважної термодинаміки). Детальний порівняльний аналіз цих теорій представлений у роботі [5]. Ця теорія широко застосовувалася до непродовольчих матеріалів, і зовсім недостатньо прикладів всебічного поромеханічного підходу для харчових продуктів.

Більшість існуючих моделей перенесення вологи в науковій літературі харчових продуктів являють собою припасовування (підгонки результатів моделювання до отриманих експериментальних даних) кривих, або, у трохи покращеній версії, просто приймають теплопровідність для перенесення енергії та дифузійне перенесення для вологості [9]. При цьому вирішуються рівняння нестационарної теплопровідності (або дифузії), які використовуються для визначення за експериментальними даними ефективної теплопровідності (або коефіцієнтів дифузії). Відмінною рисою є використання опису перенесення через границю, що рухається (завдання Стефана), що дозволяє відстежити поверхню розділу рідина-пара, де відбувається внутрішнє випаровування. При прийнятті такої моделі поверхня розділу рідина-пара, де здійснюється випаровування, відокремлюються повністю насичені та абсолютно сухі області продовольчої сировини. Детальний опис механізмів перенесення в пористих середовищах включає випаровування і утворення, при цьому, керованого тиском потоку під час обробки інтенсивним нагріванням [3]. У роботі [7], базуючись на нерівноважній термодинаміці, було запропоновано гібридний підхід теорії суміші до дифузії. Надалі застосування теорії Flory-Rehner дозволило передбачати розширювальний тиск, що діє на перенесення вологи у матеріалі.

Опис деформації у продовольчих матеріалах є особливим порівняно з всебічним описом безпосереднього перенесення. Зазвичай використовуються два різні підходи: експериментальні дані про стиснення, які описуються функцією вмісту вологи, або адитивності об'ємів різних компонентів використовуваних для передбачення деформації з наявних втрат вологості [4]. Моделювання перенесення в нежорстких продовольчих матеріалах як проблема механіки твердого тіла та рішення лінійного балансу імпульсу для твердої матриці використовується рідко, хоча цей підхід часто застосовується, щоб вивчити сушіння деяких інших матеріалів, таких як деревина та кераміка. Детальний огляд моделей сушіння, які включають ефекти стиснення, представлений у роботі [4], включаючи фундаментальні роботи.

Постановка завдання. З урахуванням представленої характеристики стану проблеми, в даному дослідженні планується здійснити спробу розвинути термовологомеханіку сушіння харчових продуктів на основі систем диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу та описати різні такі процеси. Особливого технологічного значення набуває гістерезис кривих ізотерм адсорбції-десорбції, які корисні для прогнозування терміну придатності їжі, контролю висихання та запобігання певним негативним явищам, таким як прилипання або злежування порошкоподібних харчових продуктів, а також ризиків псування харчових продуктів в залежності від a_w (активність води) Задача покращення процесу теплового сушіння продуктів у примусовому режимі зводиться до визначення співвідношень між параметрами процесу: температурою сушильного агента на кожній ступені, часом витримки, початковою температурою сушіння і початковою, і кінцевою вологістю продукту, які дозволять без зниження якості готового продукту провести процес з мінімальним сумарним часом сушіння при мінімальних енергозатратах. Важливо також оцінити для біологічних матеріалів, застосування моделі дифузійної теорії, яка регулюється рівнянням дифузії. Дослідити в даному контексті положення теорії капілярності в якій потік вологи визначається капілярними силами, а не градієнтом концентрації вологи. На основі випаровувально-конденсаційної теорії випаровування і конденсацію необхідно розглянути як сполучний механізм перенесення маси та внутрішньої теплоти, де маса переходить у пароподібний стан, а теплота обмінюється з середовищем шляхом конденсації пари або випаровування води.

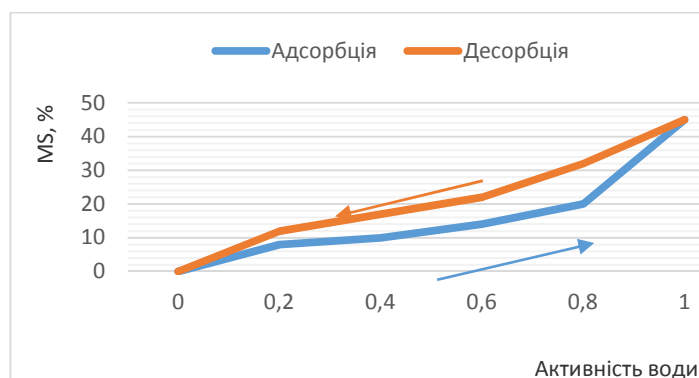


Рис. 1 – Ізотерма адсорбції та десорбції води

ординат: вміст води в продукті, виражений у г води на 100 г сухої речовини MS (% сухої речовини) (рис. 1).

Ці дві криві, як правило, відрізняються оскільки висихання продукту (від $a_w = 1$ до $< 0,6$) призводить до незворотних змін у структурі та пористості. Під час сушіння нас особливо цікавить крива десорбції, яку можна розділити на 3 зони (рис. 1).

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо ізотерми адсорбції та десорбції води. В харчовому продукті вологість в основному залежить від вмісту води і температури. Крива, що представляється для даної температури як функція вмісту вологи в продукті має значення активності води ($A_w = a_w$).

Ізотерма адсорбції, визначається експериментально, починаючи з сухого продукту. Ізотерма десорбції, визначається експериментально, починаючи з продукту, насиченого водою. Графічно зобразимо ці криві. На осі абсцис: відкладемо активність води A_w в продукті, на осі

Зона 1 ($0 \leq 0,2$): характеризується утворенням молекулярного моношару на поверхні продукту (сили Ван-дер-Ваальса між гідрофільними групами та молекулами води). Адсорбція відбувається поступово до утворення моношару, що покриває зовнішню поверхню і пори продукту. Вода знаходиться у зв'язаному стані (жорсткі, міцні водневі зв'язки). Перехід до наступної зони відбувається, коли вся поверхня насичена.

Зона 2 ($0,2 \leq 0,6$): Адсорбція молекул водню відбувається на вихідному моношарі або включенням молекул води капілярним шляхом. Ізотерма в цій зоні лінійна. Це проміжний стан між твердим і рідким.

Зона 3 ($> 0,6$): вода, присутня в рідкому стані в порах матеріалу. Мікрокапілярна вода є безперервною фазою.

Аналіз ізотерми адсорбції та десорбції показує, що дві криві не накладаються. При розглядуваному вмісті води рівновага десорбції нища, ніж рівновага адсорбції. Це пов'язано з тим, що процес адсорбції зазвичай більш енергетично вигідний, ніж десорбція, особливо якщо молекули води міцно зв'язані з поверхнею, а явище гістерезису з'являється для значень $> 0,2$.

Гістерезис можна пояснити двома спостереженнями:

Пори харчових продуктів зазвичай менші на поверхні, ніж у глибині. Тиск водяної пари, необхідний для заповнення, вищий, ніж тиск, при якому пори зневоднюються;

Гістерезис особливо виражений у фруктах і овочах, оскільки цукри в цих продуктах утворюють перенасичені розчини, які не випадають в осад при зневодненні.

Ізотерми адсорбції-десорбції в харчових технологіях представляють значний інтерес. З термодинамічної точки зору ізотерми адсорбції дають інформацію про ентальпію «сорбції» і про тип зв'язку води з сухою речовиною продукту.

Зі структурної точки зору вони дозволяють краще зрозуміти роль розміру частинок, аморфного стану і питомої поверхні в явищах десорбції або адсорбції водяної пари;

З технологічної точки зору вони корисні для прогнозування терміну придатності їжі, контролю висихання та запобігання певним негативним явищам, таким як прилипання або злежування порошкоподібних харчових продуктів. Саме відносний склад білків, крохмалю, мінеральних солей і сахарози визначає ізотерми адсорбції. Завдання полягає в тому, щоб їх ослабити; для цього можемо використати різні добавки, такі як сіль, цукор, щоб знизити вміст води без зміни стану продукту. Ці добавки цінні для харчових продуктів із середньою вологістю $< 35\%$ і $A_w 0,6 \leq 0,8$. У герметичній упаковці (сушені ковбаси, сухофрукти, печиво тощо) зберігають свою стабільність протягом кількох тижнів.

Крім того, стан сполук продукту впливає на швидкість фіксації води; наприклад, за певної вологості аморфна сахароза утримує більше води, ніж кристалізована сахароза, оскільки перехід з одного фазового стану в інший викликає видалення води, коли кристал стає впорядкованим. Ця трансформація пов'язана як з вологістю, так і з температурою. Під час кристалізації вода, що виділяється, розчиняє кристали у зовнішніх шарах, тоді як внутрішні шари закріплюють свою кристалізацію та перетворюються в масу. Вода, видалена з кристала, також може повторно локалізуватися на інших компонентах і утворювати липку масу.

Чим менше в харчових продуктах води, тим краще вони зберігаються, оскільки розмноження мікробів і хімічні реакції обмежені (рис. 2).

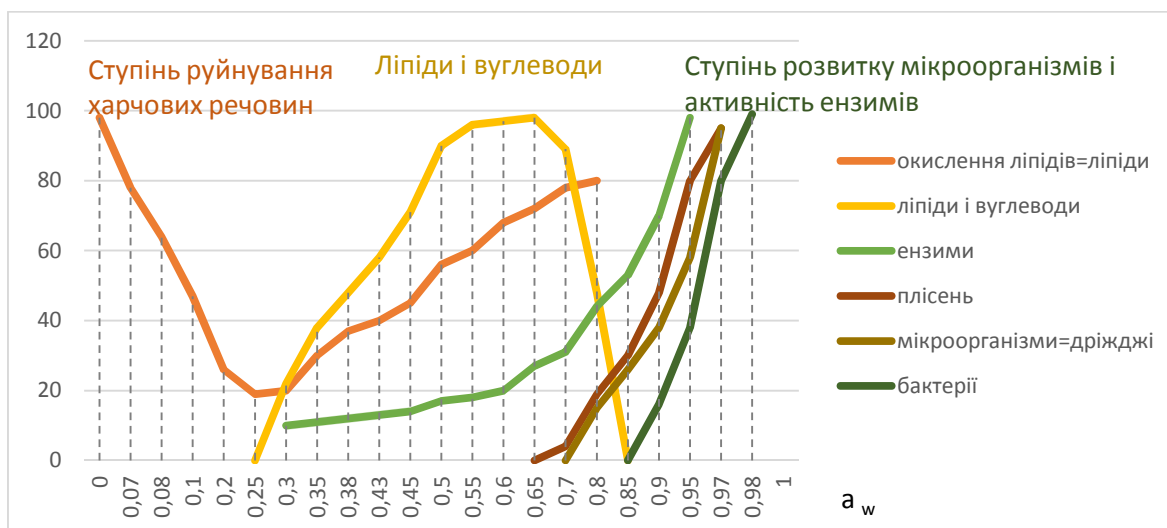


Рис. 2 – Ризик псування харчових продуктів на основі a_w

Ізотермічні криві корисні для прогнозування поведінки харчових продуктів після технологічної обробки та умов зберігання. Структуру моделювання термовологомеханіки сушіння включає опис процесів перенесення теплоти та вологи, а також деформації, на основі теорії розширення поромеханіки [5]. Для опису перенесення теплоти та маси використовуються класичні закони як у масовому транспортуванні (закони Дарсі

та Фіка), і у теплопровідності (закон Фур'є). Для вирішення таких задач приймаються такі припущення рис.3:



Рис. 3 – Припущення в моделюванні термовологомеханіки сушіння

Біологічні матеріали показують нелінійну поведінку "Напруження-деформація" для великих деформацій (на 30-70 %).

Сушіння є результатом випаровування води спочатку з рідкого стану, яка утворюється від нагрівання вологого продукту. Як відомо отримання теплоти можна забезпечити конвекцією (прямі сушарки), кондукцією (контактні сушарки або непрямі сушарки) і шляхом випромінювання. Перенесення вологи всередині харчових продуктів у формі твердого тіла може відбуватися будь-яким з наведених нижче механізмів масообміну рис. 4.

Різницею гідростатичного тиску, коли внутрішні швидкості випаровування відсутні і не перевищують швидкості переносу пари через тверду речовину в навколишнє середовище та загальний градієнт тиску діє як рушійна сила для перенесення речовини (порівняно з передачею Дарсі).

Дифузією рідини, якщо вологе тверде тіло має температуру нижчу за точку кипіння рідини

Дифузією пари, якщо рідина випаровується всередині продукту

Дифузією Кнудсена, якщо сушіння відбувається при температурах і тисках дуже низьких, наприклад, у процесі сублімаційного сушіння

Поверхневою дифузією (можливою, але не доведеною)

Однією або кількома комбінаціями вказаних механізмів

Рис. 4 – Механізми перенесення вологи всередині харчових продуктів у формі твердого тіла

Перенесення вологи в харчовому продукті залежить як від структури пор та взаємодія вологи з харчовою матрицею. На сьогоднішній день розроблено багато моделей одночасного тепло- та масообміну при сушінні. Вони ґрунтуються або на перенесенні вологи при ефективній дифузії, або на розділенні дифузії рідини та дифузії пари. Розглянемо огляд цих моделей з деякими припущеннями (Srikatden & Roberts, 2007).

Розглянемо модель дифузійної теорії яка регулюється рівнянням дифузії. Вперше цю модель запропонував використовувати – Льюїс і Шервуд з його співробітниками, які застосували цю ідею і отримали розв'язки рівняння дифузії які добре узгоджувалися з експериментальними даними. Шервуд зауважив, що поведінка основних параметрів моделі є складною і було важко передбачити зменшення дифузії з концентрацією води (Remache & Belhamri, 2008).

Дифузія відбувається в межах тонкої структури твердого тіла, а також у капілярах, порах і дрібних порожнинах, насичених водяною парою. Ця пара дифундує назовні, доти, доки є відкритий кінець капілярної трубки, який втягується в потік повітрям.

На жаль, теорія дифузії не враховує усадку, зміцнення, або явища ізотермічної сорбції/десорбції (Gustavo & Humberto, 1996). Вона добре підходить до продуктів безперервної структури (Шаро і Кавайе, 1995).

Ця теорія припускає, що рух води до поверхні твердого тіла регулюється законом Фіка, який відображає явище міграції водяної пари з навколишнього середовища висушуваного тіла з більш сильною концентрацією води до середовища найнижчої концентрації води, іншими словами, від центру матеріалу, який потрібно висушити, до його поверхні. Потім відбувається випаровування води на поверхні продукту який є результатом зовнішнього джерела енергії.

Міграція води шляхом дифузії пропорційна градієнту концентрації води:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla W), \quad (1)$$

де W - вміст води, % db (dry basis) (вміст води обчислений у відсотках від сухої маси матеріалу;

D_{eff} - коефіцієнт дифузії, $m^2 s^{-1}$;

t: час, с.

Температурну залежність ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} можна описати за допомогою рівняння Ареніуса.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (2)$$

де E_a - енергія активації, Дж моль⁻¹;

T - абсолютна температура, K;

D_0 - еталонний коефіцієнт дифузії, $m^2 s^{-1}$;

R_g - універсальна газова стала, Дж моль⁻¹ K⁻¹.

Дослідимо в даному контексті положення теорії капілярності. Капілярний потік - це рух рідини через капіляри, пори взаємозв'язку в твердому тілі або на поверхні твердого тіла за рахунок молекулярного притягання між ними рідини та твердого тіла (Srikiatden & Roberts, 2007).

Теорію капілярності застосовують як основний механізм міграції води при сушінні сипких матеріалів. У цій теорії потік вологи визначається капілярними силами, а не градієнтом концентрації вологи. Тому потік може бути спрямований у бік збільшення концентрації води.

Отже деякими дослідниками підтримане це спостереження та модель сушіння пористих матеріалів на основі капілярності як механізму обмеження швидкості передачі вологості на початку сушіння, потім дифузія пари як явище, домінуюче в завершальній стадії сушіння (Srikiatden & Roberts, 2007). Ця теорія добре застосовується до пористих продуктів або до гранульованих продуктів (в останньому випадку проміжки або проміжки між частинками мають поведінку, подібну до поведінки матеріалу з порами) (Chateau & Cavaillé, 1995).

У капілярній теорії рушійною силою є капілярний потенціал. Капілярний потенціал або всмоктування ϕ – це різниця тиску між водою та повітрям на вигнутій межі капіляру повітря-вода. Кривизна межі розділу є результатом поверхневого натягу води. Потік рідини в капілярній теорії визначається так:

$$J_c = -K_h \nabla \phi, \quad (3)$$

де J_c - потік рідини через капілярність, $kg m^{-2} s^{-1}$;

K_h - ненасичена гідравлічна провідність, $m s^{-1}$;

ϕ - капілярний тиск або потенціал всмоктування, $kg m^{-2}$;

В ізотермічних умовах капілярний потенціал пропорційний концентрації рідини в твердому тілі. Тоді градієнт цієї концентрації є основною рушійною силою.

При випаровувально-конденсаційній теорії випаровування і конденсацію можна розглядати як сполучний механізм перенесення маси та внутрішньої теплоти, де маса переходить у пароподібний стан, а теплота обмінюється з середовищем шляхом конденсації пари або випаровування води.

Розроблена модель для опису механізмів теплопередачі коли вода випаровується з твердого тіла або коли водяна пара конденсується в твердому середовищі. Таким чином, модель Генрі зазвичай називають моделлю випаровування-конденсації (Srikiatden & Roberts, 2007). Баланси енергії та маси наведені (Bossart, 2006) нижче:

Масоперенос

$$D \nabla^2 \rho_d - \frac{\partial \rho_d}{\partial t} = m_p \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (4)$$

Дифузія тепла

$$D_{ch} \nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} = -C_T \frac{\partial W}{\partial t} \quad (5)$$

Рівняння балансу

$$\frac{\partial w}{\partial \rho_d} = a_1 \quad i \quad \frac{\partial w}{\partial T} = -a_2 \quad (6)$$

Вважається, що пара в порах знаходиться в рівновазі з парою, адсорбованою на стінках.

де D - коефіцієнт молекулярної дифузії, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

ρ_d : концентрація речовини, що дифундує, у твердій речовині, кг м^{-3} ;

$m_p = \frac{1-\psi}{\psi} \rho_{sol}$ - маса твердої речовини, що містить одиницю пор, кг м^{-3} ;

Ψ – пористість;

D_{ch} - коефіцієнт дифузії теплоти, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

T – температура, К ;

C_T - константа, що стосується підвищення температури внаслідок адсорбції вологості що виникає в твердому тілі, К ;

W : Маса дифундуючої речовини в твердому тілі, кг кг^{-1} ;

a_1, a_2 : константи.

При розгляді моделі дифузії водяної пари допускається, що переважаючим механізмом висушування є внутрішня дифузія пари. Кінг, вивчаючи десорбцію води в пористій їжі, встановив математичну модель, засновану на припущенні, що передача маси всередині твердого тіла відбувається в основному в паровій фазі. Передача теплоти розглядається поряд з масопередачею. У будь-який час вологість у фазі конденсації більша, ніж у паровій фазі, тому перенесення вологи здійснюється шляхом дифузії через парову фазу. Зв'язок між сорбційною вологістю і тиском пари в газовій фазі частково описується ізотермою десорбції.

Рівняння, що виражає швидкість зміни вмісту вологи в пористому гігроскопічному матеріалі, за словами Кінга, має наступну форму (Bossart, 2006):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$D_{eff} = \frac{D p_{vsat}}{\rho_{sul} R T} \frac{P_T}{P_T - P_W} \left(\frac{\partial a_W}{\partial X} \right)_T \left(\frac{a}{1+a} \right) \quad (8)$$

де

$$a = \frac{\lambda_{th} R^2 T^3}{q_s^2 D a_W p_{vsat}} \quad (9)$$

W - абсолютна вологість твердого тіла, кг води кг^{-1} сухої твердої речовини;

D_{eff} : ефективний коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

t : час, с ;

x – відстань, м ;

D - коефіцієнт дифузії водяної пари, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

p_{vsat} - парціальний тиск водяної пари при насиченні, Па ;

ρ_{sul} - щільність сухої твердої речовини, кг м^{-3} ;

R - універсальна газова стала, $\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$;

T - температура, К ;

P_T - загальний тиск, Па ;

P_W - парціальний тиск пари води, Па ;

a_W - активність води;

λ_{th} – теплопровідність, $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$;

q_s - теплота сорбції, Дж кг^{-1} .

Коли м'який матеріал висихає, відбуваються два важливі явища – пори стискаються, і модуль пружності матеріалу збільшується, перетворюючи м'який, пружний продукт у твердий, склоподібний стан. Для однорідного розподілу вологості зміна об'єму дорівнює обсягу втраченої води. Матеріал припинить стискатися, коли в матриці рідина утворює меніски пари і, зі збільшеним модулем пружності, напруження твердої матриці зможуть врівноважити тиск, що стискає капіляри. До цього моменту скелет твердої матриці занадто м'який, щоб дозволити меніску переміщатися всередині і створювати тиск, що стискає. Припускаючи, що скелет твердої матриці є пружним, нормальне ефективне напруження може бути пов'язане з зміною об'єму.

Висновок. За результатами досліджень показані вагомні методи та раціональні технологічні моделі сушіння продуктів харчування. Розглянуті моделі слід застосовувати індивідуально для кожного окремого виду сировини з урахуванням показника активності води наведеного в роботі. Перенесення вологи в харчових продуктах залежить як від структури пор так і взаємодії вологи з продуктовою матрицею. З точки зору термодинаміки ізотерми адсорбції дають інформацію про ентальпію «сорбції» і про тип зв'язку води з сухою речовиною продукту. Комплексні рішення цих проблем мають широкі перспективи впровадження при сушінні харчової сировини і готової продукції. Проявляються перспективні системи для зниження енергоспоживання, які підвищують енергоефективність процесу виробництва харчових продуктів.

Зниження енергоспоживання не тільки підвищує енергоефективність процесів виробництва, але знижує рівень теплового впливу на продукти у результаті чого продукція стає більш біологічно цінною. В результа-

ті, в продукті зберігаються термочутливі та біологічно активні компоненти харчових інгредієнтів, що значно підвищує ефективність харчування і харчових технологій. У наслідку виробничі процеси підпорядковуються суворим правилам безпеки виробництва харчової продукції. Удосконалюються специфічні показники енерговитрат у застосовуваній технології, значно підвищуються ефективність та позитивно враховуються екологічні міркування.

References

1. Biot, M.A. (1965). *Mechanics of Incremental Deformations: Theory of Elasticity and Viscoelasticity of Initially Stressed Solids and Fluids, Including Thermodynamic Foundations and Applications to Finite Strain*, New York: Wiley.
2. Burdo O.G., Sit M.L., Zikov A.V., Reznichenko D.N., Juravleov A. A. (2016). Energy Address Delivery Technologies and Thermal Transformations in Food Production. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE* 2 (31), 55-69
3. Halder A., Dhall A., Datta A.K. (2007). An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying – part I: model development and input parameters, *Food Bioprocess Technology*, 85 (3), 209-219.
4. Katekawa M.E., Silva M.A. (2006). A review of drying models including shrinkage effects / // *Drying Technology*, 24(1), 5–20.
5. Lewis, R.W., Shrefler, B.A. (1998). *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*, New York: John Wiley and Sons
6. Schrefler, B.A. (2002). Mechanics and thermodynamics of saturated / unsaturated porous materials and quantitative solutions, *Applied Mechanics Reviews*, 55(4), 351–388.
7. Singh, P.P. (2002). Effect of Viscoelastic Relaxation on Fluid and Species Transport in Biopolymeric Materials Indiana, United States: Ph.D. Purdue University,.
8. Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying *Advances in Heat Transfer*, 13, 114–203
9. Williams, R., Mittal, G.S. (1999). Low-fat fried foods with edible coatings: modeling and simulation / R. Williams, *Journal of Food Science*, 64(2), 317–322.

BASIC APPROACHES IN RESEARCH OF THERMOMECHANIC PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER POTENTIAL DURING FOOD DRYING

Oshchypok I.M. SciD, Professor

Lviv National University named after I. Franko, Lviv, Ukraine

Abstract. The article develops the thermo-moist mechanics of drying food products based on systems of differential equations of heat and mass transfer and describes various such processes. The task of improving the process of thermal drying of products in the forced mode is considered, which consists in determining the relationships between the process parameters: the temperature of the drying agent at each stage, the exposure time, the initial drying temperature and the initial and final moisture content of the product, which will allow without reducing the quality of the finished product to carry out the process with the minimum total drying time with minimum energy consumption. Adsorption and desorption isotherms of water in food products, which depend on water content and temperature, were constructed. The desorption curve is shown, which is divided into 3 zones. Zone 1 ($0 \leq 0.2$): characterized by the formation of a molecular monolayer on the surface of the product (van der Waals forces between hydrophilic groups and water molecules). Zone 2 ($0.2 \leq 0.6$): Adsorption of hydrogen molecules occurs on the initial monolayer or by the inclusion of water molecules by capillary action. Zone 3 (> 0.6): water present in a liquid state in the pores of the material. Microcapillary water is the continuous phase. This evaluation of the application of the diffusion theory model for biological materials governed by the diffusion equation. In this context, the position of the theory of capillarity, in which the flow of moisture is determined by capillary forces, and not by the moisture concentration gradient, was studied. On the basis of the evaporation-condensation theory, evaporation and condensation were considered as a connecting mechanism of mass transfer and internal heat, where the mass goes into a vapor state, and heat is exchanged with the environment by condensation of steam or evaporation of water. The mechanisms of moisture transfer inside food products in the form of a solid body are shown.

Keywords: drying, moisture, food product, isotherm, adsorption, desorption, model

Список використаної літератури

1. Biot, M.A. *Mechanics of Incremental Deformations: Theory of Elasticity and Viscoelasticity of Initially Stressed Solids and Fluids, Including Thermodynamic Foundations and Applications to Finite Strain* / M.A.

- Biot. – New York: Wiley. – 1965
2. Burdo O.G. , Sit M.L. , Zikov A.V. , Reznychenco D.N. , Juravleov A. A. Energy Address Delivery Technologies and Thermal Transformations in Food Production. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (31) 2016 TERMOENERGETICĂ. - 55-69
 3. Halder, A. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying – part I: model development and input parameters / A. Halder, A. Dhall, A.K. Datta // Food Bioproducts Process. – 2007. – № 85 (C3). – P. 209-219.
 4. Katekawa, M.E. A review of drying models including shrinkage effects / M.E. Katekawa, M.A. Silva // Drying Technology. – 2006. – Vol. 24. – Issue 1. – P. 5–20.
 5. Lewis, R.W. The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media / R.W. Lewis, B.A. Schrefler. – New York: John Wiley and Sons, 1998.
 6. Schrefler, B.A. Mechanics and thermodynamics of saturated / unsaturated porous materials and quantitative solutions / B.A. Schrefler // Applied Mechanics Reviews. – 2002. – Vol. 55. – Issue 4. – P. 351–388.
 7. Singh, P.P. Effect of Viscoelastic Relaxation on Fluid and Species Transport in Biopolymeric Materials / P.P. Singh. - Indiana, United States: Ph.D. Purdue University, 2002.
 8. Whitaker, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying / S. Whitaker // Advances in Heat Transfer. – 1977. – № 13. – P. 114–203
 9. Williams, R. Low-fat fried foods with edible coatings: modeling and simulation / R. Williams, G.S. Mittal // Journal of Food Science. – 1999. – Vol. 64. – Issue 2. – P. 317–322.

Отримано в редакцію 11.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 11.07.2024
Approved 25.09.2024