

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ШАРУ ПАСТОПОДІБНОГО МАТЕРІАЛУ ЗІ ШТУЧНОЮ ПЕРФОРАЦІЄЮ

© Дулеба В. П., Гнатів З. Я., Семерня Е. Ю., 2018

Розглянуто проблеми, які стосуються високоінтенсивного сушіння пастоподібних термолабільних матеріалів для інтенсифікації процесу перенесення тепла і маси та забезпечення оптимальних режимних параметрів процесу з метою збереження якості готового продукту. Застосування штучної перфорації шару пастоподібного термолабільного матеріалу дасть змогу використати метод фільтраційного сушіння, який забезпечить високоінтенсивний процес зневоднення зі збереженням режимних температурних параметрів та якості готового продукту. Показано результати дослідження гідродинаміки теплоносія через перфорований шар пастоподібного матеріалу для різних значень створеної у ньому пористості.

Ключові слова: перфорація, гідродинаміка, пастоподібний матеріал, фільтраційне сушіння

V. P. Duleba, Z. Ia. Hnativ, E. Iu. Semernia

## STUDY OF THE HYDRODYNAMIC OF THE LAYER OF PASTY MATERIAL WITH ARTIFICIALLY PERFORATION

© Duleba V. P., Hnativ Z. Ia., Semernia E. Iu., 2018

The article deals with the problems associated with high-intensity drying of paste-like thermolabs materials in order to intensify the process of heat transfer and mass transfer and to provide optimum regime parameters of the process in order to preserve the quality of the finished product. The use of artificial perforation of a layer of paste-like thermoplastic material will allow the use of a filtration drying method, which will provide a highly intensive dewatering process with the preservation of regime temperature parameters and quality of the finished product. The results of the study of the hydrodynamics of the heat carrier through the perforated layer of the paste material for various values of porosity therein are shown.

Key words: perforation, hydrodynamics, paste-like material, filtration drying

**Постановка проблеми.** Пастоподібні матеріали є складними об'єктами сушіння, які характеризуються багатьма показниками, найважливішими з яких є: початкова і кінцева вологість продукту, хімічний склад, гігроскопічна та рівноважна вологість, теплофізичні, електрофізичні, структурно-механічні, масообмінні і термодинамічні характеристики. Вони визначають термостійкість та вологостійкість продуктів, а також походження, структуру та природу, агрегатний стан, призначення і спосіб використання висушених продуктів.

Однією з актуальних задач під час дослідження сушіння є встановлення залежності між вологовмістом та температурою матеріалу в процесі його зневоднення, особливо для технології високоінтенсивного сушіння пастоподібних термолабільних матеріалів. У цьому випадку існує можливість різкої інтенсифікації процесів перенесення тепла і маси, з одного боку, і небезпека перегрівання матеріалу та погіршення якості готового продукту – з іншого. Це зумовлює необхідність вибору оптимальних режимних параметрів і розрахунку таких установок, не тільки кінетику зневоднення, але й зміну температури матеріалу в процесі сушіння і нагрівання продукту

до максимально допустимого рівня. Тому процес сушіння матеріалів, які містять вільну і по-різному зв'язану вологу та схильних до злипання на ранніх стадіях сушіння часто поділяють на декілька етапів: 1) видалення позаклітинної вологи; 2) видалення вільної клітинної вологи (осмотичної); 3) видалення частини зв'язаної клітинної вологи (адсорбційної).

Одним з поширених методів зневоднення пастоподібних матеріалів є конвективне сушіння, механізм і кінетику якого детально описано в багатьох роботах. Розглянемо його характерні ознаки, переваги та недоліки.

Існує клас сушильних апаратів, в яких пастоподібні матеріали висушуються у вигляді нерухомого або малорухомого шару: шафні, шахтні, стрічкові, камерні, карусельні, барабанні.

**Аналіз останніх публікацій.** Для матеріалів, особливо чутливих до дії високих температур, у хімічній, фармацевтичній та інших галузях промисловості використовують вакуум-сушіння. Його доцільно застосовувати за умови, що матеріал сушиться до вологості, вищої за критичну, тобто в періоді постійної швидкості, коли температура матеріалу приблизно дорівнює температурі мокрого термометра, а оскільки за вакууму температура випаровування є нижчою, ніж за атмосферного тиску, то нижчою є і температура матеріалу. Однак цей метод сушіння є економічно не вигідним, особливо у багатотоннажних виробництвах [1, 2].

Детальне дослідження кондуктивного сушіння капілярно-пористих матеріалів, яке провів В. В. Красников, дало змогу розкрити його механізм під час сушіння матеріалів типу целюлози, паперу, тканин, піску тощо. В контактному шарі, що прилягає до гарячої поверхні, вологовміст впродовж всього процесу є мінімальним, в центральних шарах – максимальним, і біля відкритої поверхні є нижчим ніж біля контактної поверхні [3, 4]. Такий характер розподілу вологості – результат особливого механізму перенесення речовини під час контактного сушіння. Основними параметрами, що визначають кінетику процесу кондуктивного сушіння, є: 1) температура гріючої поверхні; 2) ступінь притискання матеріалу до гріючої поверхні; 3) параметри навколишнього середовища: температура, вологовміст, температура і вид сушильного сукна, що притискає матеріал до гріючої поверхні. Основним технологічним параметром є товщина матеріалу. Ці параметри впливають не лише на швидкість сушіння, але й на критичний вологовміст, а також на технологічні властивості та якості висушеного матеріалу. Розрахунки та дослідження показують, що кондуктивне сушіння тонких матеріалів відбувається з інтенсивністю, яка значно перевищує інтенсивність конвективного сушіння [5–6].

Краще зберегти біологічно-активні речовини в кінцевому продукті можна з використанням сублімаційного методу сушіння. Аналіз методів і технічних засобів контролю сублімаційного сушіння в умовах періодичної дії наведено у роботі. Автори запропонували теплотричний метод розрахунку умов оптимальності висушування та інструментальні методи їх визначення. Механізм і рушійні сили процесу сублімації у вакуумі відомі. Сублімаційне сушіння матеріалів під вакуумом характеризується взаємодією таких процесів:

- перенесення тепла у замороженому продукті і поглиблення шару льоду в середину матеріалу внаслідок фазового переходу, утворення сухого шару на поверхні (внутрішня задача теплообміну);

- відтік пари від поверхні сублімації через сухий шар у простір сушарки (зовнішня задача).

Дослідженням і аналізом цього комплексу складних взаємопов'язаних процесів тепломасообміну визначають напрям розроблення сушильних установок неперервної дії. Залежно від виду вихідної сировини і методів інтенсифікації сублімаційні сушильні установки неперервної дії поділяють на такі типи:

- сублімаційне сушіння з транспортною стрічкою для організації неперервного висушування гранульованого продукту в полі ІЧ-випромінювання;

- сушарки для порошкоподібних продуктів з жорстким пористим каркасом;

- установки барабанного типу з перемішуванням гранульованого продукту і видаленням сухого шару стиранням у процесі висушування;

- установки з використанням механічної вібрації частинок на нагрітій поверхні;
- установки з розпилюванням і грануляцією рідини в вакуумі в полі ІЧ-випромінювання і досушуванням гранул на вібрості;
- сублимаційні сушарки з СВЧ-підведенням.

Однак сублимаційне сушіння під вакуумом і сьогодні серед різноманітних сушильних технологій залишається найбільш енергоємним і економічно не вигідним, а тому використовується здебільшого для отримання пастоподібних біологічно-активних матеріалів високої якості, медичних препаратів [6–8].

Одним з нових перспективних методів зневоднення є метод фільтрації теплоносія крізь висушуваний шар матеріалу. Суть процесу полягає в тому, що теплоносій за дії перепаду тисків фільтрується через шар висушуваного матеріалу, поверхнею тепломасообміну в цьому випадку є розвинута поверхня всіх його пор і капілярів. Важливою перевагою цього методу є повне використання теплової енергії, оскільки протягом процесу на виході із шару матеріалу температура теплоносія наближено дорівнює температурі мокрого термометра і зростає до температури середовища вже наприкінці сушіння [6].

У промисловості для їх сушіння використовують переважно конвективний метод з використанням як теплоносія повітря. Пресовані дріжджі перед сушінням подрібнюють, надаючи їм форми гранул або вермішелі з середнім діаметром, не більшим ніж 3 мм, і завдовжки 3–4 мм. Сушіння здійснюють в апаратах різноманітних конструкцій: камерних, шафних, стрічкових, барабанних, сушарках карусельного типу, пневмогазових, розпилювальних, вакуум-сушарках, сублимаційних, у віброкиплячому шарі. Найпоширенішим є сушіння в киплячому шарі, переваги і недоліки якого наведено вище. Сушіння цього пастоподібного матеріалу і сьогодні є лімітуючою і енерговитратною стадією виробництва [6–9].

Підвищення ефективності процесу сушіння є актуальною задачею, спрямованою на можливість підвищення прибутку і конкурентоздатності продукції завдяки зниженню витрат енергоресурсів та зниження техногенного пресингу на довкілля внаслідок уникнення викидів дрібнодисперсної фази в атмосферу. Існуючі методи сушіння є тривалими в часі і характеризуються великими енергетичними затратами, потребують наявності газоочисного обладнання. Тому експериментальні роботи спрямовані на вивчення технології сушіння пекарських дріжджів та пошуки нових високоефективних енергоощадних методів зневоднення [7–9].

Як видно з аналізу джерел літератури, існуючі методи сушіння пастоподібних матеріалів є низькопродуктивними, енерго- та металомісткими і не завжди забезпечують високу якість готового продукту. У разі використання сушарок з активними гідродинамічними режимами утворюється велика кількість дрібнодисперсної фракції, для вловлювання основної частини якої існує необхідність у встановленні очисного обладнання. Не вловлена частина дрібної фракції завдає шкоди здоров'ю людей та довкіллю, а також спричиняє порушення однорідності штаму біологічно-активного матеріалу (пекарських дріжджів) [6].

На основі вищесказаного можна зробити висновок про ефективність та перспективність фільтраційного сушіння. Враховуючи переваги цього методу під час сушіння матеріалів різної природи та структури, варто очікувати значного збільшення ефективності процесу зневоднення і для згаданих пастоподібних матеріалів. Тому необхідно дослідити процес сушіння методом фільтрації теплоносія через висушуваний шар в напрямку поверхня матеріалу → фільтраційна перегородка пекарських дріжджів – пастоподібних матеріалів, що відрізняються за природою, походженням та структурою.

**Мета дослідження.** Метою роботи є вивчення гідродинаміки пастоподібних матеріалів органічного походження (пекарських дріжджів) методом фільтрації теплоносія крізь сформований шар з метою зменшення енергетичних затрат та викидів дрібнодисперсної фази у навколишнє середовище із збереженням якості готового продукту в процесі фільтраційного сушіння. А також використання одержаних результатів для створення методики розрахунку конструктивних параметрів сушарок для зневоднення досліджуваних пастоподібних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вивчити гідродинаміку вологих шарів пекарських дріжджів зі створеною в них штучною пористістю.

**Експериментальна частина.** Гідравлічний опір вологого шару матеріалу є важливим параметром енергетичного оцінювання, ефективності та економічної доцільності процесу зневоднення. Дослідження гідродинаміки сушіння методом фільтрації теплоносія крізь шар матеріалу у напрямку шар матеріалу → перфорована перегородка проведено для пастоподібного матеріалу органічного походження, який являє собою живий біологічно-активний організм. І залежно від швидкості руху теплоносія визначають характер зміни гідравлічного опору сухого матеріалу, а також вплив на механізм сушіння та кінетику процесу.

Оскільки сушіння під час фільтрування теплоносія крізь шар висушуваного матеріалу має зональний характер, то внаслідок переміщення вологи від верхніх шарів до нижніх відбуваються зміни в його структурі. Збільшення пористості шару (через утворення сітки тріщин) у процесі його зневоднення є причиною зменшення гідравлічного опору і збільшення швидкості руху теплоносія.

Оскільки пекарські дріжджі належать до пастоподібних матеріалів, то загальна картина зміни гідравлічного опору та фіктивної швидкості теплоносія під час сушіння є схожою на ту, яку отримали в результаті досліджень гідродинаміки вологого шару.

Результати досліджень впливу величини штучної пористості на гідродинаміку вологого шару матеріалу показано на рис. 1.

Наявність в шарі матеріалу штучної пористості істотно впливає на величину та характер зміни гідравлічного опору. Зменшення гідравлічного опору відбувається у два етапи: перший триває від початку сушіння, другий починається через 250–400 с і закінчується через 500–1000 с (залежно від величини штучної пористості). Для суцільного шару матеріалу різке зменшення перепаду тисків відбувається в один етап – через 1200 с від початку сушіння [167, 168].

Протягом 1200 с гідравлічний опір суцільного шару майже не змінюється, оскільки теплоносії практично не рухається крізь шар матеріалу внаслідок його великого гідравлічного опору, що є характерним для пастоподібних матеріалів. За цей час поверхня матеріалу висихає і внаслідок дії усадкових явищ у поверхневих шарах починається утворення невеликої кількості значних за розмірами тріщин, через що різко зменшується гідравлічний опір від 83000 до 3450 Па. Інтенсивність сушіння залишається низькою, оскільки лімітуючою стадією процесу є молекулярна дифузія вологи із внутрішніх шарів до поверхні. Подальше сушіння матеріалу відбувається із повільним зменшенням гідравлічного опору до  $\Delta P_{\text{сyx}} = 1765$  Па.

Для кривих, що характеризують гідродинамічну картину у разі створення штучної пористості, відсутній період  $\Delta P = \text{const}$  і значно швидше досягається  $\Delta P_{\text{сyx}}$ . Від початку сушіння теплоносії рухається переважно крізь пористу структуру. Випаровування вологи відбувається із поверхні матеріалу та поверхні стінок отворів із одночасним збільшенням їхніх розмірів внаслідок усадкових явищ, що приводять до різкого зменшення гідравлічного опору шару. Одночасно нагрівається і весь матеріал з частковим пароутворенням, а також дифузією вологи із каналів шару. Отже, в цьому випадку сушіння – процес зневоднення як у каналах внаслідок молярного перенесення, так і молекулярної дифузії вологи у вигляді рідини і пари.

Друге різке зменшення гідравлічного опору шару відбувається, коли за дії усадкових явищ утворюється сітка наскрізних тріщин, і поверхня тепломасообміну значно зростає. Значення гідравлічного опору, що відповідає сухому матеріалові, досягається для шару з  $S = 1,32$  % приблизно за 500 с. Із збільшенням пористості структури зростає інтенсивність сушіння в штучних каналах і перенесення вологи завдяки молекулярній дифузії до їхніх стінок, але зменшується можливість зміни структури міжканальних ділянок. Зміна форми кривих для  $S = 5$  і  $10$  % пояснюється тим, що на початку сушіння вплив усадкових явищ є меншим. Величини  $\Delta P_c$  для шару з  $S = 5$  % досягають приблизно за 750 с, для  $S = 10$  % – за 1000 с. Збільшення тривалості досягнення  $\Delta P_c$  пояснюється меншим значенням частки “e” в міжканальних ділянках шару для  $S = 10$  % ніж для  $S = 1,32$  %.

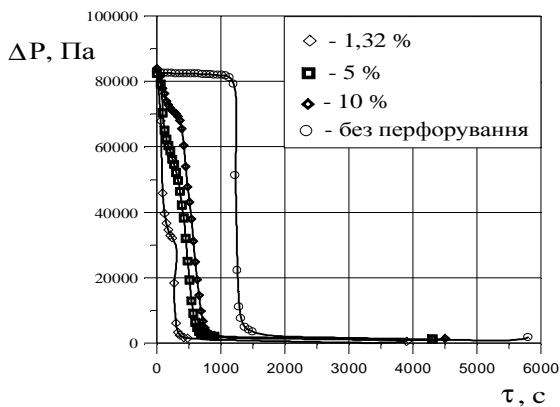


Рис. 1. Зміна гідравлічного опору вологого шару пекарських дріжджів у часі для різних значень створеної у ньому пористості,  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $H = 2 \cdot 10^3\text{ м}$

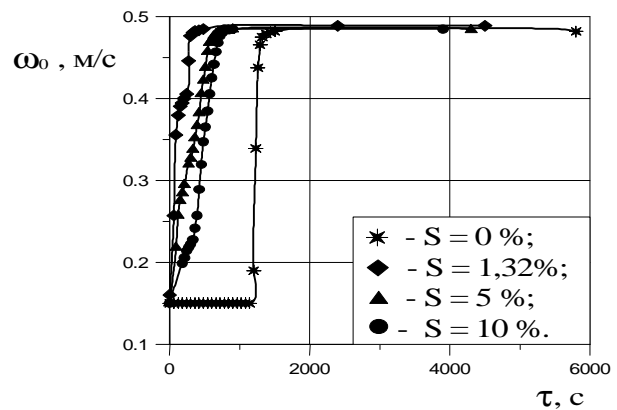


Рис. 2. Зміна фіктивної швидкості руху теплоносія крізь шар вологих пекарських дріжджів,  $H = 2 \cdot 10^2\text{ м}$ ,  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  за змінних значень штучної пористості шару

У разі збільшення штучної пористості до 10 % низька швидкість зменшення  $\Delta P$  за високих гідравлічних опорів пояснюється відсутністю усадкових явищ до досягнення певної вологості, після чого виникає ділянка зменшення гідравлічного опору з постійною швидкістю. Таке зменшення  $\Delta P$  визначається збільшенням розмірів каналів внаслідок усадкових явищ та утворенням дрібної сітки наскрізних тріщин, хоча істотним є і вплив молекулярної дифузії до каналів, кількість яких, а відповідно і поверхня тепломасообміну в процесі сушіння зростає.

На рис. 2 показано зміну фіктивної швидкості руху теплоносія в часі залежно від величини штучної пористості шару. В процесі сушіння гідравлічний опір зменшується, а швидкість руху теплоносія зростає внаслідок збільшення частки вільного об'єму в шарі матеріалу.

**Висновок.** На основі експериментальних досліджень встановлено вплив природи пастоподібних матеріалів органічного походження (пекарських дріжджів), структури шару на механізм фільтрації теплоносія крізь створений шар.

Вивчено гідродинаміку методом фільтрації теплоносія крізь висушуваний шар у напрямку поверхня матеріалу  $\rightarrow$  пориста перегородка за наявності в шарі штучної пористості.

Аналіз існуючих методів сушіння пастоподібних матеріалів у нерухомому шарі показав, що для пекарських дріжджів кращі гідродинамічні та кінетичні показники зафіксовано у разі їх сушіння в щільному шарі зі штучною перфорацією.

1. Филонов А. П. Мероприятия по реализации “Концепции развития химической промышленности Украины” // Хімічна промисловість України. – 2002. – № 1. – С.3–6. 2. Снежкин Ю. Ф. Состояние и перспективы развития сушильной техники в Украине // Тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и тепловые процессы)” СЭТТ, 2005. – М.: ИТТФ НАНУ. – 2005. – С. 225–229. 3. Гінзбург А. С. Сушка пищевых продуктов. – М.: Пищепромиздат, 1960. – 683 с. 4. Лыков А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с. 5. Атаманюк В. М. Теплообмін під час фільтраційного сушіння гранульованого і осадженого поліакриламідю [Текст] / В. М. Атаманюк, М. С. Мальований, В. П. Дулеба // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20. – С. 113–121. 6. Атаманюк В. М., Гумницький Я. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: монографія / Атаманюк В. М., Гумницький Я. М. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с. 7. Атаманюк В. М. Кінетика фільтраційного сушіння шлаку теплових електростанцій / В. М. Атаманюк, І. Р. Барна // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2012. – № 41. – С. 89–93. 8. Iryna V. Intradiffusionmasstransferduringdryingofslaggravelrawgranule / В. Iryna, G. Yaroslav, V. Atamanyuk. // Chemistry&ChemicalTechnology. – 2013. – No. 7. – С. 461–466. 9. Атаманюк В. М. Масовідача у першому періоді фільтраційного сушіння дрібнодисперсних матеріалів / Володимир Михайлович Атаманюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6. – С. 14–22.