

УДК 66.047.3

ANALYSIS OF SPRAYING DEVICES DESIGNS FOR DRYING LIQUID FOOD PRODUCTS

D. Bondarchuk, R. Yakobchuk*National University of Food Technologies*

Key words:

spraying devices,
drying apparatus,
liquid food products,
rotary disc,
nozzle,
ejection phenomenon

Article history:

Received 09.04.2025

Received in revised form
22.04.2025

Accepted 25.04.2025

Corresponding author:

yakroman@ukr.net

ABSTRACT

The article presents a comprehensive analysis of atomizing device designs used in food drying equipment, particularly in spray drying systems. The feasibility of using rotary disk and nozzle-type atomizers is substantiated based on the physicochemical properties of the material to be dried, operating conditions of the dryer, and requirements for the final product. The working principles, structural features, and operational advantages of each atomizer type are described in detail.

Special attention is given to the materials used in the manufacture of atomizers. A comparative analysis of steel grades, ceramics, and polymers according to international standards is provided, evaluating their thermal resistance, wear resistance, and suitability for contact with food substances. The interdependence between atomizer design, material properties, and the quality of the final dried product is explored.

Various airflow schemes within the drying chamber — co-current, counter-current, and mixed flow — are analyzed separately. The study demonstrates how the choice of flow scheme affects the efficiency of heat and mass transfer. The integration of rotary atomizers with ejector-type devices is highlighted as a promising approach for intensifying the drying process, improving spray uniformity, and reducing energy consumption.

The results obtained can be used in the design of new drying equipment and in the modernization of existing systems. Future research directions are proposed, including experimental testing of combined atomizer-ejector designs and numerical modeling of heat and mass transfer processes within the drying chamber.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-18

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ РОЗПИЛЕННЯ АПАРАТІВ ДЛЯ СУШІННЯ РІДКИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Д. С. Бондарчук, ORCID ID: 0009-0006-8915-0372

Р. Л. Якобчук, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9777-5790

Національний університет харчових технологій

У статті проведено аналіз пристроїв розпилення, що застосовуються в сушильних апаратах розпилювального типу для різних харчових продуктів. Розглянуто конструкції основних типів пристроїв розпилення, принципи роботи, переваги та недоліки. Досліджено вплив схем подачі теплоносія на ефективність процесу сушіння та якість кінцевого продукту. Запропоновано перспективний напрям удосконалення дискових розпилювачів шляхом їх поєднання з ежекційними пристроями для підвищення ефективності масообміну та енергоефективності процесу сушіння. Зроблено висновок про ключову роль вибору розпилювального пристрою та режиму сушіння для досягнення оптимальних характеристик порошкоподібних харчових продуктів.

Ключові слова: пристрої розпилення, апарат сушіння, рідкі харчові продукти, диск, форсунка, ежекційне явище.

Постановка проблеми. Сушіння є одним із ключових методів консервації харчових продуктів, що значно подовжує термін їх зберігання, не змінюючи при цьому харчову цінність. У промислових масштабах для цього процесу широко застосовують сушильні апарати, серед яких особливе місце займають розпилювальні апарати. Вони дають змогу отримувати порошкоподібні продукти із чітко визначеними характеристиками вологості, гранулометричного складу й органолептичними властивостями [33].

У розпилювальних сушильних апаратах відбувається процес перетворення рідких харчових продуктів (наприклад, молока, кави, фруктових соків) на сухі порошки зі збереженням їхньої поживної цінності [33]. Цей метод, відомий як розпилювальне сушіння, поширений у харчовій промисловості. Принцип роботи таких сушильних апаратів полягає в розпиленні рідини на дуже дрібні краплі, які потім швидко висушуються в потоці гарячого теплоносія (зазвичай повітря) [31]. Завдяки великій площі поверхні контакту крапель з гарячим повітрям створюються умови для інтенсивного випаровування вологи, що призводить до утворення сухих частинок продукту [31].

Центральним елементом конструкції таких апаратів є розпилювальний пристрій. Він визначає спосіб введення рідкого матеріалу в сушильну камеру і суттєво впливає на ефективність процесу випаровування вологи та якість кінцевого продукту [20]. Найбільш поширеними типами розпилювачів є дискові та форсункові, кожен з яких має свої конструктивні особливості та переважні сфери застосування. Вибір оптимального розпилювального пристрою залежить від низки факторів, таких як в'язкість продукту, бажаний розмір частинок кінцевого продукту у вигляді порошку, необхідна продуктивність сушильного апарата та інші технологічні вимоги [32].

Дискові розпилювачі працюють за рахунок відцентрової сили. Рідина подається на поверхню диска, що обертається з високою швидкістю. Під дією відцентрових сил рідина розпадається на дрібні краплі на периферії диска [3]. Ця технологія забезпечує досить рівномірний розподіл крапель і дає змогу регулювати їх розмір, змінюючи

швидкість обертання диска. Проте для стабільної роботи необхідно мінімізувати вібрацію диска та забезпечити рівномірну подачу рідини в його центральну частину [3].

Форсункові розпилювачі створюють дрібнодисперсний аерозоль за допомогою енергії стисненого повітря (пневматичні форсунки) або високого тиску самої рідини (гідравлічні форсунки). Рідина під тиском проходить через малий отвір (зазвичай 1,0—1,4 мм), утворюючи факел дрібних крапель. Цей метод особливо ефективний для рідин з низькою в'язкістю, які не містять твердих частинок, оскільки вузькі канали форсунок схильні до забивання. Регулювання продуктивності форсункових розпилювачів є складним завданням, оскільки зміна швидкості потоку рідини безпосередньо впливає на розмір крапель, що утворюються [5, 16].

Окрім типу розпилювача, важливим аспектом процесу сушіння є схема організації потоку теплоносія відносно розпиленого продукту в сушильній камері. Ця схема визначає умови теплообміну та суттєво впливає на якісні характеристики кінцевого продукту [24]. Вибір між прямотечійною, протитечійною чи змішаною схемами подачі теплоносія є критично важливим для забезпечення енергоефективності процесу та рівномірності сушіння продукту [29].

Аналіз пристроїв розпилення є необхідним етапом у вдосконаленні технології розпилювального сушіння, оскільки саме ці компоненти визначають ефективність диспергування рідкої сировини, рівномірність формування крапель, швидкість випаровування вологи та, відповідно, якість і однорідність готового порошкоподібного продукту. Вивчення конструктивних особливостей розпилювачів, їхнього впливу на розмір крапель, а також адаптивність до різних фізико-хімічних властивостей сировини дає змогу оптимізувати технологічні режими сушіння, підвищити енергоефективність процесу та мінімізувати втрати корисних компонентів у продукті.

Мета досліджень: аналіз конструктивних особливостей і принципів роботи пристроїв розпилення рідких харчових продуктів, що використовуються в сушильних апаратах розпилювального типу, тенденції розвитку, а також оцінювання впливу режиму подачі теплоносія на якість процесу сушіння.

Матеріали і методи. Дослідження базується на аналізі науково-технічної літератури, присвяченої сушінню рідких харчових продуктів методом розпилювання, конструктивним особливостям розпилювальних пристроїв та їх застосуванню. Узагальнення і виділення основних напрямів розвитку розпилювального методу сушіння.

Результати дослідження. Розпилювальні сушильні апарати є ключовим обладнанням у харчовій промисловості, забезпечуючи ефективне перетворення рідких продуктів у стабільну порошкоподібну форму. Конструкція цих апаратів безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту [29]. Основними компонентами розпилювального сушильного апарату є:

- камера сушіння — сновний об'єм, де відбувається процес розпилення рідини та її контакт з гарячим теплоносієм;
- пристрій розпилення — механізм (дисковий або форсунковий), що перетворює рідину на дрібні краплі;
- система подачі теплоносія — забезпечує контрольоване надходження гарячого повітря (або іншого теплоносія) в сушильну камеру;
- система збору продукту — включає циклонні сепаратори, фільтри або інші пристрої для відокремлення сухого порошкоподібного продукту від потоку відпрацьованого теплоносія.

Існують різні конфігурації розпилювальних сушильних апаратів [29]:

- одноступеневий розпилювальний сушильний апарат. Рідина розпилюється у верхній частині вертикальної камери і контактує з гарячим повітрям, що рухається переважно зверху вниз (прямотік). Сухий продукт збирається в нижній частині камери, а відпрацьоване повітря виводиться через верхні патрубки;

- тристадійний розпилювальний сушильний апарат. Процес сушіння відбувається у три етапи: первинне розпилення та сушіння в основній камері; додаткове досушування у вбудованому шарі (наприклад, киплячому); фінальне сушіння та/або охолодження в окремому апараті (наприклад, інстантайзері). Така схема дає змогу досягти рівномірнішого видалення вологи та покращити якість кінцевого продукту.

Ефективність процесу сушіння значною мірою визначається схемами організації руху теплоносія та подачі продукту в сушильну камеру [29]. Основними схемами є:

- прямотечійна схема. Гарячий теплоносій і розпилений продукт рухаються в одному напрямку, зазвичай зверху вниз. Розпилення відбувається у верхній частині камери, і краплі рухаються вниз разом із потоком гарячого повітря. Ця схема забезпечує швидке початкове випаровування вологи, знижує ризик термічного пошкодження продукту (оскільки краплі контактують з найгарячішим повітрям на початку, коли вони ще містять багато вологи) і сприяє збереженню його якості;

- протитечійна схема. Гарячий теплоносій подається знизу вгору, тоді як розпилений продукт рухається зверху вниз. Це створює зустрічний рух потоків, що покращує ефективність теплопередачі на кінцевих стадіях сушіння та сприяє досягненню нижчої кінцевої вологості продукту;

- змішана схема. Поєднує елементи прямотечійної та протитечійної схем. Наприклад, гаряче повітря може подаватися тангенційно, створюючи закручений потік у камері. Це сприяє більш рівномірному розподілу температури та інтенсифікує теплообмін у сушильній камері.

Вибір схеми подачі теплоносія та продукту залежить від типу використовуваного розпилювального пристрою [30].

Для дискових розпилювачів, які розпилюють рідину переважно в горизонтальній площині на високих швидкостях, ефективними можуть бути як прямотечійна, так і протитечійна схеми. Прямотечійна схема (повітря зверху вниз) дає змогу краплям рухатися разом із потоком теплоносія, мінімізуючи час їх перебування в зоні високих температур і знижуючи ризик перегріву.

Для форсункових розпилювачів, які створюють спрямований факел крапель під високим тиском, частіше застосовують протитечійну схему (повітря знизу вгору). Це забезпечує ефективну зустріч крапель з потоком теплоносія, підвищуючи інтенсивність теплопередачі та сприяючи більш рівномірному висушуванню.

Вибір між дисковими та форсунковими розпилювачами залежить від властивостей продукту та вимог до процесу сушіння:

- дискові розпилювачі, зазвичай, забезпечують кращу однорідність розміру крапель і добре підходять для роботи з в'язкими рідинами;

- форсункові розпилювачі ефективні для рідин з низькою в'язкістю, але потребують ретельної фільтрації продукту для запобігання забиванню сопел.

Для досягнення оптимального результату сушіння необхідно враховувати взаємозв'язок між конструкцією сушильної камери, параметрами повітряного потоку та обраним типом розпилювача, адаптуючи їх один до одного [22, 31, 32].

Інтенсифікація процесів сушіння рідких продуктів спрямована на прискорення тепло- та масообмінних процесів між краплями рідини та теплоносієм. У промисловій практиці для цього використовуються декілька основних підходів:

- оптимізація розпилення. Зменшення середнього розміру крапель розпиленого продукту та підвищення однорідності їх розміру (монодисперсності);
- підвищення відносної швидкості руху фаз. Забезпечення інтенсивнішого контакту частинок продукту з теплоносієм шляхом збільшення їхньої відносної швидкості;
- збільшення потенціалу сушіння. Застосування вищих температур теплоносія для прискорення випаровування вологи;
- попереднє підігрівання рідини. Зменшення енерговитрат на випаровування вологи шляхом попереднього нагрівання продукту перед розпиленням [9, 11].

Розпилювальні пристрої, що використовуються в сучасних сушильних апаратах, здатні забезпечити досить тонке розпилення продукту, з середнім розміром сухих частинок до 50 мкм [10]. Однак надто дрібні частинки ускладнюють їх уловлювання в системах аспірації (наприклад, циклонах) з потоку відпрацьованого теплоносія. Втім удосконалення конструкцій циклонів та інших систем пиловловлення дає змогу ефективно видаляти навіть дрібнодисперсні частинки [17]. Таким чином, досягнення вищої монодисперсності крапель під час розпилення є важливим напрямом інтенсифікації сушіння. Це не лише покращує економічні показники процесу, але й підвищує ефективність роботи допоміжного обладнання.

Аспекти інтенсифікації сушіння шляхом збільшення відносної швидкості руху частинок і теплоносія детально розглянуті в низці досліджень [20, 22, 31—33]. Цей підхід демонструє найкращі результати на початкових етапах сушіння (період сталої швидкості), однак його ефективність знижується на завершальному етапі зневоднення [13].

Ще одним перспективним напрямком інтенсифікації сушіння рідких продуктів є підвищення температури теплоносія [2]. Збільшення температури гарячого повітря на вході в сушильний апарат сприяє зростанню продуктивності процесу. Проте це також призводить до підвищення температури відпрацьованого теплоносія, що може негативно вплинути на якість термочутливих харчових продуктів.

Зазначені методи інтенсифікації найбільш ефективні на етапі сталої швидкості сушіння, коли відбувається інтенсивне випаровування вільної вологи з поверхні крапель. У розпилювальних сушильних апаратах цей етап переважно локалізований у зоні факела розпилення, де видаляється основна маса вологи [3, 5, 22, 33].

Подальший розвиток технологій сушіння рідких харчових продуктів передбачає комплексне вдосконалення обладнання, зокрема: розробку удосконалених конструкцій сушарок; створення ефективних систем розподілу теплоносія; розробку надійних механізмів для видалення сухого продукту та відпрацьованого теплоносія; а також покращення конструкцій самих пристроїв розпилення.

Сучасні дослідження в галузі сушіння харчових продуктів спрямовані на вдосконалення конструкцій розпилювачів та оптимізацію всього процесу [20, 32]. У працях [9, 11, 30] розглядаються новітні технології та обладнання, що дають змогу підвищити ефективність сушіння та покращити якість кінцевого продукту. Додатково у дослідженнях [9, 11, 30, 32] аналізується вплив конструкції розпилювачів на аеродинамічні характеристики потоків у сушильній камері та на кінцеві властивості одержуваного порошку.

Методи розпилення рідини можна класифікувати за фізичними принципами, що лежать в основі процесу диспергування. Основними з них є: гідравлічний, пневматичний, механічний, електростатичний, пульсаційний, метод з попереднім газонасиченням та акустичний [24, 30].

Гідравлічне розпилення. Руйнування суцільності потоку рідини відбувається під дією тиску нагнітання. Проходячи через малий отвір сопла, рідинний потік набуває високої швидкості, що призводить до його дестабілізації та розпаду на краплі (у формі суцільного струменя, плівки або великих крапель) [7, 23]. Конструкція форсунки суттєво впливає на характер розпилення та форму факела [23, 33]. За принципом дії гідравлічні форсунки поділяють на струменеві, із зіткненням струменів, ударно-струменеві, відцентрові, відцентрово-струменеві та комбіновані [23, 24]. У струменевих форсунках рідина витікає під високим тиском через малий отвір, формуючи полідисперсний факел з малим кутом розкриття [14, 18, 23, 24]. Геометрія отвору форсунки (щілинні, циліндричні, кільцеві, з круговим розрізом) визначає форму факела (плоский, циліндричний, конічний, радіальний) та характеристики аерозолі. Гідравлічний метод характеризується високим ККД (2—4 кВт на тонну рідини) і дає змогу отримувати краплі в широкому діапазоні розмірів (10—2600 мкм) [8, 24]. Однак він не дозволяє формувати монодисперсний факел. Необхідність використання форсунок з малими діаметрами отворів ускладнює їх виготовлення та підвищує вимоги до чистоти рідини, оскільки навіть незначні домішки можуть призвести до засмічення каналів. Це обмежує застосування даного методу [8, 24].

Пневматичне розпилення. Диспергування рідини відбувається внаслідок її динамічної взаємодії з високошвидкісним потоком газу (зазвичай повітря) [23, 24]. Газовий потік передає свою кінетичну енергію рідині, спричиняючи її розпад на струмені, а потім на краплі. Розмір крапель (зазвичай 100—2000 мкм) визначається відносною швидкістю газу та рідини [14, 18, 24, 29]. Пневматичні форсунки класифікують за рівнем перепаду тиску, місцем контакту фаз (внутрішнє або зовнішнє змішування), розподілом маси, характером руху потоків та їх взаємною орієнтацією [23, 24]. У форсунках внутрішнього змішування контакт відбувається всередині конструкції, що сприяє попередньому утворенню більших крапель, які потім додатково подрібнюються аеродинамічними силами. Перевагою пневматичного методу є гнучкість регулювання продуктивності та дисперсності шляхом зміни параметрів потоків рідини та газу. До недоліків відносять можливі хімічні зміни у складі рідини через контакт з газом і потенційне підвищення тиску в замкнених системах. Пневматичний спосіб вважається найефективнішим для процесів сушіння рідких харчових продуктів у киплячому шарі з нанесенням на інертний носій [10, 12, 33].

Механічне (відцентрове) розпилення. Енергія для диспергування надається рідині за рахунок тертя об швидкообертний робочий елемент (зазвичай диск) [20, 23, 24, 32]. Під дією відцентрових сил рідина відривається від краю робочого елемента і розпадається на краплі, утворюючи факел з дисперсністю 50—150 мкм. Пристрої класифікують за способом подачі рідини та конструкцією робочого елемента (дискові, чашкові, конусні, зіркові тощо) [24]. Форма факела залежить від конструкції робочого елемента. Наприклад, чашкові розпилювачі формують широкий конічний факел, а повітря, що проходить через центр, сприяє додатковому подрібненню рідинної плівки. Цей метод доцільно використовувати в сушільних апаратах, але він має обмеження: відносно груба дисперсність аерозолі, низький ККД (близько 15 кВт на тонну рідини) [24] та обмежені можливості регулювання через зв'язок між продуктивністю та дисперсністю.

Електростатичне розпилення. Під дією сильного електричного поля на поверхні рідинної плівки виникає нерівномірний розподіл тиску, що призводить до її деформації, втрати стійкості та руйнування на дрібні краплі [23, 24]. Процес реалізується

шляхом подачі високого електричного потенціалу до рідини у спеціальних електро-статичних форсунках. Залежно від призначення, форсунки бувають для розпилення рідин, нанесення покриттів або розпилення порошків. Особливістю методу є можливість отримання монодисперсного розпилу за низької витрати рідини та досягнення краплями релєвського критерію нестабільності. Утворюються довгі рідинні нитки (для низьков'язких рідин), які розпадаються на окремі краплі під дією кулонівських, гідродинамічних та гравітаційних сил. Отримані краплі мають високий електричний заряд. Розмір крапель, зазвичай, становить 140—420 мкм [20, 24, 32]. Висока швидкість процесу ускладнює стабілізацію факела та кероване транспортування аерозолю. Однак перевагою для сушильних апаратів є можливість контрольованого спрямованого руху аерозолю вздовж силових ліній поля, що мінімізує втрати. Застосування методу обмежене високою вартістю обладнання, значними енерговитратами, зниженою надійністю високовольтних систем та потребою у кваліфікованому персоналі.

Пульсаційне розпилення. Рідко використовується самостійно, частіше поєднується з іншими методами (гідравлічним, пневматичним, механічним, електростатичним). Руйнування потоку рідини відбувається шляхом накладання пульсацій (механічних або тиску), що збільшує поверхневу енергію, порушує стійкість потоку та інтенсифікує диспергування. Пульсації створюються шляхом періодичного перекриття каналів або генерації коливань тиску перед форсункою [24]. Форма факела та дисперсність аерозолю залежать від частоти пульсацій. Наприклад, при використанні форсунок з механічним переривником, зменшення частоти пульсацій зменшує кут розпилу та щільність факела. Технічні обмеження часто не дають змогу підвищувати частоту понад 20 Гц. Перевагою поєднання пульсаційного методу з іншими є покращена якість та однорідність дроблення рідини на краплі (дисперсність 30—100 мкм) [24] без значного збільшення енерговитрат чи ускладнення конструкції.

На основі аналізу можна сформулювати ключові вимоги до пристроїв розпилення для сушіння: забезпечення малої дисперсності аерозолю, вузький діапазон розмірів крапель (висока монодисперсність), можливість електронного регулювання продуктивності в широкому діапазоні, висока надійність і технологічність конструкції.

Розпилювальне сушіння залишається одним з найефективніших методів отримання порошків у харчовій промисловості. Ефективність процесу значною мірою залежить від вибору розпилювача, який впливає на розмір частинок, якість порошку, стабільність біоактивних компонентів та енергоефективність [24].

Традиційно широко використовуються дискові ротаційні розпилювачі та форсунки, що працюють під тиском.

Дискові розпилювачі забезпечують високу продуктивність і стабільний розмір крапель, що сприяє рівномірності сушіння. Однак вони споживають значну кількість енергії, а їх ефективність знижується при роботі з в'язкими рідинами [4, 20, 32].

Форсунки, що працюють під тиском, дають змогу точніше контролювати розмір частинок, але мають вищий ризик закупорювання сопел, що може порушити стабільність процесу [33].

Сучасні тенденції спрямовані на зниження енерговитрат, підвищення стабільності біоактивних сполук та оптимізацію розмірів частинок порошку.

Струменеві форсунки. Перспективне рішення, що дає змогу працювати з рідинами високої в'язкості та формувати монодисперсні краплі. Це покращує однорідність порошку та зменшує енергоспоживання завдяки більш рівномірному висиханню [22].

Нанорозпилювачі та електростатичні розпилювачі. Набули розвитку для сушіння біоактивних і термочутливих компонентів (ферментів, вітамінів, антиоксидантів). Вони дають змогу отримувати порошки з підвищеною біодоступністю та стабільністю, але їх застосування переважно обмежене лабораторними умовами [2].

Імпульсне розпилювальне сушіння надає можливість зменшити обмеження щодо в'язкості рідин і скоротити енерговитрати порівняно з традиційними методами. Проте ця технологія ще перебуває на стадії досліджень [2].

Аналіз досліджень [1, 2, 4, 13] показує, що дискові розпилювачі та форсунки під тиском залишаються найбільш оптимальними, коли немає специфічних вимог до характеристик порошку. Струменеві форсунки виділяються високою енергоефективністю та якістю порошку, тоді як імпульсні та електростатичні методи є оптимальними для термочутливих речовин.

Отже, вибір типу розпилювача (форсунковий чи дисковий) має ґрунтуватися на аналізі його впливу на кінцеві характеристики продукту та врахуванні фізико-хімічних властивостей сировини.

Одним із недоліків традиційних розпилювальних дисків (рис. 1) є недостатня ефективність використання сушильного агента. Значна частина теплоносія, що рухається в центральній зоні сушильної камери, мінімально контактує з розпиленими краплями і, відповідно, слабо бере участь у процесі сушіння. Конструктивно такі диски можуть мати прямі або закручені канали для виходу рідини [9, 11, 25—29].

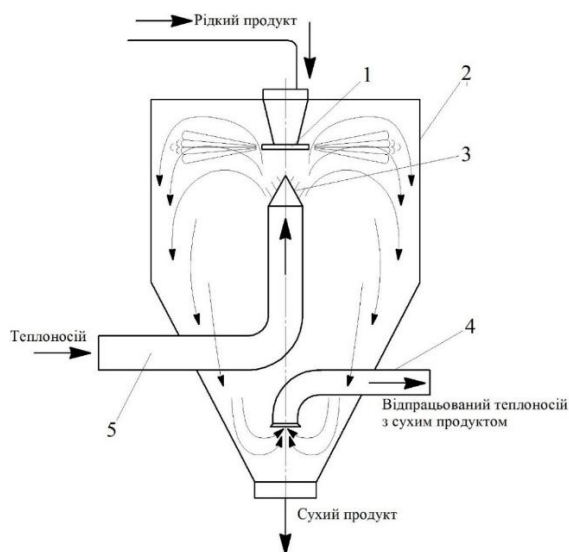


Рис. 1. Схема протитечійного руху теплоносія і продукту в апаратах із дисковим пристроєм розпилення: 1 — дисковий пристрій розпилення; 2 — сушильна камера (башта) апарата; 3 — пристрій розподілу теплоносія; 4 — патрубок відведення теплоносія і сухого продукту; 5 — патрубок подачі теплоносія

На основі літературного огляду та попередніх досліджень [14—16, 18], висунуто припущення (що потребує подальших досліджень) про доцільність поєднання розпилювальних пристроїв із процесами (пристроями) ежекції для підвищення ефективності сушіння харчових продуктів (рис. 2).

Основні конструктивні особливості таких дисків включають:

- розташування радіальних лопатей на нижній стороні корпусу розпилювального диска;
- додаткове закріплення верхньої та нижньої профільних пластин до корпусу диска, які формують конфузور, горловину та дифузор навколо зони виходу рідини з соплових отворів;
- наявність зазору між торцями соплових отворів диска та горловиною профільних пластин для забезпечення ежекції сушильного агента.

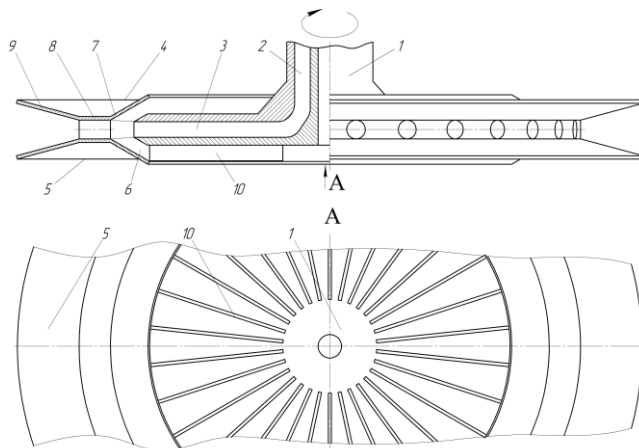


Рис. 2. Розпилювальний диск з ежекційним пристроєм: 1 — корпус; 2 — розподільні канали; 3 — соплові отвори; 4 — верхня профільна пластина; 5 — нижня профільна пластина; 6 — зазор між корпусом диска та профільними пластинами; 7 — конфузورها частина; 8 — горловина; 9 — дифузор; 10 — радіальні лопаті

Принцип роботи удосконаленого диска. Рідина подається через розподільні канали до соплових отворів. Під дією відцентрової сили при обертанні диска (до 10 000 об/хв) рідина диспергується у вигляді крапель у зоні конфузора, утвореного профільними пластинами. Високошвидкісний потік крапель, що виходить із сопел, створює розрідження в зоні горловини, що призводить до ежекції (підсмоктування) сушильного агента (гарячого повітря) через зазор з центральної зони сушильної камери. Таким чином, конфузورها частина виконує функцію приймальної камери ежектора. Радіальні лопаті на нижній частині диска сприяють активному втягуванню додаткової кількості теплоносія з периферійної зони камери та його подачі під надлишковим тиском в зону розпилення.

У горловині та дифузорі відбувається інтенсивний контакт розпилених крапель з підсмоктаним та поданим лопатями гарячим теплоносієм, що ініціює процес сушіння. Частково висушена суспензія далі надходить в основний об'єм сушильної камери, де процес досушування продовжується під дією гравітаційних сил та основного потоку теплоносія.

Перевагами такої конструкції диску є те, що принцип ежекції дає змогу ефективно залучити до процесу сушіння центральний потік сушильного агента, який у традиційних системах використовується неефективно. Масообмінні процеси в зоні ежектора (конфузор, горловина, дифузор) відбуваються з високою інтенсивністю.

Активне перемішування крапель з теплоносієм та подача додаткового теплоносія лопатями під тиском сприяють більш рівномірному та інтенсивному висушуванню. Збільшення дальності польоту крапель завдяки зниженню аеродинамічного опору

(однонаправленість потоків) подовжує час контакту фаз, що покращує тепло- та масообмін і якість кінцевого продукту.

Інтенсифікація масообміну в зоні ежектора дає змогу підвищити загальну енергоефективність сушильного апарата без значних додаткових енерговитрат на подачу теплоносія. Можливе підвищення енергоспоживання приводу диска через додаткові лопаті може бути компенсоване зменшенням діаметра диска без погіршення якості розпилення.

Запропоновані рішення дають змогу оптимізувати процес сушіння, забезпечуючи гарантований рівень вологості продукту, підвищуючи ефективність тепло- та масопередачі та зменшуючи втрати тепла з відпрацьованим теплоносієм.

Оптимальний вибір типу розпилювального пристрою залежить від комплексу факторів: фізико-хімічних властивостей рідини (в'язкість, корозійна активність, температура), вимог до розміру крапель, продуктивності, економічних аспектів (вартість обладнання) та умов експлуатації.

Матеріал, з якого виготовлено дисковий розпилювач, відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективності розпилення, довговічності конструкції та загальної продуктивності процесу. Критеріями вибору матеріалу є стійкість до агресивних середовищ, температурна витривалість, механічна міцність і вартість.

У конструкції розпилювачів широко застосовуються жаростійкі та корозійно-стійкі матеріали, зокрема нержавіючі сталі марок AISI 304, AISI 316 та їх аналоги, які забезпечують високу стійкість до дії агресивних середовищ і температур. Керамічні матеріали, як-от оксид алюмінію (Al_2O_3) або карбід кремнію (SiC), використовуються для виготовлення зносостійких вставок у форсунках, де потрібна висока твердість і стабільність при абразивному зношуванні. Серед полімерних матеріалів найбільш застосовуваними є фторопласт (PTFE), поліпропілен (PP) і поліетилен високої щільності (HDPE), що відзначаються хімічною інертністю, низьким коефіцієнтом тертя та допустимістю контакту з харчовими продуктами. Вибір матеріалу визначається умовами експлуатації розпилювача — температурою, тиском, агресивністю середовища та в'язкістю сировини.

Раціональний підбір матеріалу диска та конструкції розпилювача є ключовим для ефективності розпилення, якості продукту, економічності експлуатації та продуктивності процесу.

Вибір схеми подачі теплоносія, зокрема при використанні дискових розпилювачів, має суттєвий вплив на ефективність масо- та теплообміну всередині сушильної камери. Як показано в [9, 11, 20—22, 29, 32], характер подачі повітря (прямотечійна, протитечійна чи змішана) визначає динаміку сушіння, ступінь утворення агломератів, рівномірність висушування та розмір частинок кінцевого продукту. Встановлено, що оптимізація режимів подачі теплоносія дає змогу не лише інтенсифікувати процес випаровування вологи, а й істотно зменшити питомі енерговитрати, що є критично важливим для промислових масштабів виробництва.

Висновки. Проведений аналіз підтверджує, що конструкція розпилювального пристрою, вибір матеріалів його виготовлення та режим подачі теплоносія мають вирішальне значення для ефективності процесу розпилювального сушіння. Зокрема, конструктивні особливості розпилювачів визначають дисперсність крапель, рівномірність розпилення, швидкість випаровування вологи, енергоефективність процесу та фізико-хімічні характеристики кінцевого продукту.

Серед існуючих типів дискові розпилювачі є одними з найефективніших для обробки в'язких рідин завдяки здатності забезпечити стабільну продуктивність, рівномірний розподіл частинок і високу якість продукту. Їх перевагою також є регулюваність процесу шляхом зміни швидкості обертання та простота конструкції.

Для інтенсифікації масо- та теплообміну перспективним напрямом є поєднання дискових розпилювачів з ежекційними пристроями, що дає змогу активніше втягувати теплоносії до зони розпилення, посилювати турбулентність і теплопередачу, зменшити розмір крапель і час висушування. Таке комбіноване технічне рішення може суттєво підвищити енергоефективність сушильних апаратів і знизити експлуатаційні витрати.

Практичне значення наведеного аналізу полягає в систематизації конструктивних рішень для розпилювальних пристроїв, аналізі матеріалів їх виготовлення, а також в обґрунтуванні доцільності використання комбінованих схем подачі теплоносія та рідини.

Подальші дослідження будуть зосереджені на комп'ютерному моделюванні процесів розпилення та сушіння для різних конфігурацій апаратів; експериментальній перевірці ефективності поєднаних конструкцій пристроїв розпилення; оптимізації параметрів теплоносія та гідродинаміки в сушильних камерах; дослідженні зношування елементів розпилювачів з різних матеріалів у промислових умовах.

Отже, результати цього аналітичного дослідження формують теоретичну та прикладну базу для проектування новітніх енергоефективних сушильних апаратів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Askari Vasselabadi, S., Gharibzahedi, S. M. T., Greiner, R., Vale, J. M., Oveneri, A. C., Rashidinejad, A., Roohinejad, S. (2025). Advancements in spray-drying for the microencapsulation of fat-soluble vitamins: stability, bioavailability, and applications. *Journal of Food Biochemistry*, 1, 1—20. <https://doi.org/10.1155/jfbc/9974476>.
2. Dantas, A., Costa, D., Felipe, X., Gou, P. (2023). Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*, 4(1), 100382. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>.
3. Dutta, S., De Wilde, J., Pati, J. (2021). Experimental study of the temperature distribution and water evaporation in an axial dual-zone vortex chamber spray dryer. *Drying Technology*, 40(13), 2794—2811. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1966635>.
4. Huang, L., Kumar, K., Mujumdar, A. (2006). A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(6), 461—470. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.11.004>.
5. Huang, X., Edrisi, M., Langrish, T. (2018). Review of some common commercial and noncommercial lab-scale spray dryers and preliminary tests for a prototype new spray dryer. *Drying Technology*, 36(15), 1900—1912. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1459679>.
6. Isik, S., Yildiz, C. (2022). A new spray dryer supported with freely rotatable propellers enables more efficient drying of milk samples. *Thermal Science*, 26(2), C, 1871—1882. <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI210223205I>.
7. Jackiw, I. M., Ashgriz, N. (2021). On aerodynamic droplet breakup. *Journal of Fluid Mechanics*, 913(A33). <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.7>.
8. Jaworek, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A. (2018). Electrospray application to powder production and surface coating. *Journal of Aerosol Science*, 125, 57—92. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.04.006>.
9. Khanzharov, N. S., Abdizhapparova, B. T., Ospanov, B. O., Dosmakanbetova, A. A., Baranenko, A. V., Kumisbekov, S. A., Serikuly, Zh. (2018). Designs of dryers based on combination of vacuum and atmospheric drying of food products. *NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 431(5), 141—149. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170x.20>.

10. Li, J., Pan, Y., Chen, G., Mujumdar, A., Zhou, M. (2004). Fluidized-bed drying of biological materials: Two case studies. *Chin. J. Chem. Eng.*, 12, 840—842.
11. Misirli, C., Şahin, M., Yildirim, B. (2015). Properties analysis of the spray nozzles in drying plant. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21, 469—484.
12. Mohideen Batcha, M. F., Amirnordin, S. H., Md Yudin, A. S. (2023). 4-Fluidized Bed Dryers. In *Drying Technology in Food Processing*. Jafari, S. M., Malekjani, N., Eds. Woodhead Publishing: Sawston, UK, 67—122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819895-7.00006-7>.
13. Nik Abd Rahman, N. F. N., Zubairi, T. D. S., Hashim, H., Yaakob, H. (2024). Revolutionizing spray drying: An in-depth analysis of surface stickiness trends and the role of physicochemical innovations in boosting productivity. *Journal of Food Quality*, 1, 8929464. <https://doi.org/10.1155/2024/8929464>.
14. Ponomarenko, V., Pushanko, N. (2015). *Sprays fluid: an effective way to intensify the processes in the food*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing.
15. Ponomarenko, V., Sliusenko, A., Liulka, D., Lementar, S., Forostiuk, I., Yakymchuk, M. (2022). Process of sugar solutions sulfitation in terms of hygienic requirements for equipment operation. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 40, 3—12. URL: <https://keypublishing.org/jhed/jhed-volumes/volume-40/> (дата звернення: 01.02.2025).
16. Ponomarenko, V., Sliusenko, A., Liulka, D., Yakobchuk, R. (2023). Determination of the ejection coefficient of a liquid-gas ejector with a combined mixing chamber. *Ukrainian Food Journal*, 12(3), 419—432. <http://dx.doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-8>.
17. Samborska, K., Jedlińska, A., Barańska-Dołomisiewicz, A., Wiktor, A., Michalska-Ciechanowska A., Goula, A. (2024). Chapter 6 — *Spray drying of sugar-rich food products*. *Spray Drying for the Food Industry*, 145—188. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00018-1>.
18. Sliusenko, A., Ponomarenko, V. (2021). Water-air ejector with conical-cylindrical mixing chamber / transl. by I. Forostiuk. *Acta Polytechnica*, 61(6), 768—776. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0768>.
19. Thakur, C., Kaushal, M., Vaidya, D., Verma, A., Gupta, A., Sharma, R. (2024). Unlocking the potential of spray drying for agro-products: exploring advanced techniques, carrier agents, applications, and limitations. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 1181—1220. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03544-4>.
20. Tufekchi, V., Veresotskyi, Y. (2022). Investigation of aerodynamic properties of louver distribution of heat carrier in spray-drying complexes. *Food Reviews International*, 39(9), 6602—6610. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2122991>.
21. Кривоніс, Л. Е. (2017). Фактори, що впливають на збереження якісних характеристик продукта при сушінні в розпилювальних сушарках. *Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 21—24 березня. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegr/all-fbtegr-2017/paper/view/2955> (дата звернення: 01.02.2025).
22. Лементар, С. Ю., Пономаренко, В. В., Вересоцький, Ю. І., Якобчук, Р. Л. (2017). Моделювання процесу розпилення молока дисками з різними конструкціями сопел. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. Київ, 23(4), 98—104.
23. Луговський, О. Ф., Ляшок, А. В., Пижигов, Ю. О. (2011). Способи та пристрої для отримання рідинного аерозолі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія машинобудування, 1(61), 107—113.
24. Луговський, О. Ф., Шульга, А. В., Берник, І. М., Гришко, І. А., Мовчанюк, А. В., Зілінський А. І. (2022). *Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування*: монографія. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В.
25. Патент на корисну модель № 105637 UA, МПК B05B 3/12 (2006.01). Диск розпилювальний / О. О. Ревтов, А. О. Сушко, С. І. Костик, В. Ю. Шибецький; заявник О. О. Ревтов, А. О. Сушко, С. І. Костик, В. Ю. Шибецький. № u201510046; заявл. 15.10.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.
26. Патент на корисну модель № 134312 UA, МПК A23C1/00, A23C1/04 (2006.01). Розпилювальна сушильна установка для рідких продуктів з двоступеневим роторним розпилювальним пристроєм / М. М. Пушанко, А. С. Дубівко, А. В. Середюк; заявник Національний університет харчових технологій. № u201812378; заявл. 13.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9.
27. Патент на корисну модель № 117728 UA, МПК B01F5/00, B01F5/18 (2006.01). Розпилювач рідини / П. А. Пацуровський, Л. І. Лейбович; заявник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. № u201613289; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

28. Патент на корисну модель № 107374 UA, МПК B05B3/02, B05B3/12 (2006.01). Канальний відцентровий розпилювач рідин / Л. М. Черняк; заявник Л. М. Черняк. № a201500910; заявл. 05.02.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 13.

29. Сидоров, Ю. І. (2012). Розпилювальні сушарки в біотехнології. *Biotechnology*, 5(4), 46—54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/biot_2012_5_4_6 (дата звернення: 01.02.2025).

30. Тихтило, Б. В., Костенко, О. М., Дрожжана, О. У. (2022). Характеристика розпилювальних сушильних установок. *Інноваційні аспекти системи безпеки праці, захисту інтелектуальної власності: матеріали VII всеукр. наук.-практ. інтернет-конф.*, м. Полтава, 24—25 берез. Полтава: ПДАУ.

31. Турчина, Т., Малецька, К., Авдєєва, Л., & Макаренко, А. (2023). Інтенсивність масопереносу при сушінні колоїдних розчинів та рідких гетерогенних систем. *Scientific Works*, 87(1), 56—61. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2691>.

32. Туфекчі, В., Вересоцький, Ю. (2022). Розпилювальне сушіння молочних продуктів — дослідження швидкісних характеристик теплоносія та продукту в дисковому розпилювальному комплексі. *Наука онлайн*, 12, 1—13.

33. Якобчук, Р. Л., Яровий, В. Л. (2012). Визначення висоти зони активного теплообміну у процесі сушіння пивних дріжджів у вібропсевдозріженому шарі інертного матеріалу. *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. праць*. Донецьк: ДонНУЕТ ім. Туган-Барановського, 2(29), 71—78.