JUSTIFICATION OF PRODUCT SELECTION FOR DRYING IN SMALL-SIZED DRYERS WITH DISK SPRAYING DEVICE

D. Bondarchuk, ORCID ID: 0009-0006-8915-0372
R. Yakobchuk, ORCID ID: 0000-0001-9777-5790

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Keywords:
disc atomizer,
compact drying unit,
juice,
purée,
craft production

Article history:
Received 11.01.2026
Received in revised form 24.01.2026
Accepted 05.02.2026
Published 27.02.2026

Corresponding author:
R. Yakobchuk
E-mail: yakroman@ukr.net

DOI: 10.24263/2225-2916-2026-39-1-22

Abstract

An approach to selecting food products for drying in compact spray drying units with a disc atomizer is considered. This is relevant for craft and small-scale production, where processing small batches, energy efficiency, and consistent powder quality are critical. It is shown that raw-material properties and the design constraints of compact units substantially affect the ability to obtain powders with the required quality.

A system of evaluation criteria is proposed, accounting for the physicomechanical properties of the raw material, suitability for disc atomization using small-diameter discs (50—100 mm), technological flexibility at low product flow rates, commercial potential, and regulatory limitations. The results are summarized using an integral score on a five-point scale, and an example of ranking promising products is provided. The feasibility of focusing on fruit and vegetable juices and purées is substantiated, as these are among the most versatile feedstocks for small-scale production.

Approaches to determining key parameters of the disc atomizer and the drying chamber are generalized, and typical chamber design solutions are systematized: a compact cylindrical chamber, a chamber with an enlarged lower cone, and a configuration with a local fluidized-bed section for final drying. The rationale for applying these configurations is outlined depending on product viscosity and the risk of stickiness/deposition, which enables alignment of atomization, drying, and powder quality requirements (moisture content, flowability, solubility).

The obtained results can be used for preliminary product selection and for substantiating the layout and parameters of compact spray drying units in craft and small-scale food production.

ISSN 2225-2916

CC BY

УДК 66.047.596: 664

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОДУКТУ ДЛЯ СУШІННЯ В МАЛОГАБАРИТНИХ СУШИЛЬНИХ АПАРАТАХ З ДИСКОВИМ ПРИСТРОЄМ РОЗПИЛЕННЯ

Д. С. Бондарчук, аспірант, ORCID ID: 0009-0006-8915-0372
Р. Л. Якобчук, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9777-5790
Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

Розглянуто підхід до вибору харчових продуктів для сушіння у малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилювачем. Запропоновано критерії оцінювання, що враховують фізико-механічні властивості сировини, придатність до дискового розпилення на дисках 50—100 мм, роботу з малими партіями, комерційний потенціал і регуляторні обмеження. Узагальнення виконано інтегральним індексом за п'ятибальною шкалою. Обґрунтовано пріоритет овочево-фруктових соків/пюре та наведено типові рішення сушильних камер і параметрів розпилювача для малих виробництв.

Ключові слова: *дисковий розпилювач, малогабаритний сушильний апарат, сік, пюре, крафтове виробництво.*

Постановка проблеми. В останні роки підприємства малої потужності з виробництва харчових продуктів, у тому числі крафтові, демонструють стійке зростання як в Україні, так і у світі. Їх розвиток обумовлений попитом на локальні, натуральні та високоякісні продукти [11, 27]. Зростання ролі таких виробників сприяє формуванню ринку, розширенню асортименту нішевих продуктів і підтриманню регіональної ідентичності харчової продукції. Міжнародні аналітичні звіти підкреслюють, що стійкість агропромислових мереж постачання неможлива без активного залучення малих переробних підприємств, які працюють на локальні ринки та короткі відстані постачання [11, 27, 37]. Водночас такі підприємства стикаються з низкою технологічних перешкод: обмежені фінансові ресурси, відсутність адаптованого промислового обладнання та складність впровадження енергоефективних процесів переробки [28, 44], причому саме ця група виробників найчастіше обмежена в доступі до компактних установок для переробки та сушіння харчових продуктів [37, 38].

Для підприємств малої потужності, зокрема крафтових, характерні невеликі партії продукції, сезонність сировини (насамперед фруктово-овочевої, ягідної та рослинної), а також високі вимоги до органолептичної якості та збереження біологічно активних речовин. Одним із найбільш універсальних способів збереження такої продукції є процес сушіння з отриманням порошкових інгредієнтів, які використовують як наповнювачі, ароматизатори, барвники, основи для напоїв, соусів чи функціональних добавок [23]. Процес сушіння істотно впливає на фізико-хімічні, органолептичні та харчові властивості продукту: при надмірних температурах і неконтрольованих режимах можливі потемніння, втрата летких ароматичних компонентів, деградація вітамінів та антиоксидантів, зміна структури частинок [17]. Огляд сучасних технологій сушіння показує, що поряд із традиційним конвективним сушінням активно розвиваються енергоощадні та комбіновані методи (інфрачервоне, мікрохвильове, вакуумне, сублімаційне, сушіння у псевдозрідженому шарі тощо). Проте більшість

таких рішень орієнтована на середні й великі виробництва та потребує значних капіталовкладень [18], що створює розрив між наявними технологічними можливостями та реальними потребами підприємств малої потужності [37, 38].

Серед апаратів для одержання порошкоподібних харчових продуктів важливе місце посідають розпилювальні сушильні апарати, які забезпечують дуже короткий час контакту частинок продукту з теплоносієм і дають змогу висушувати термочутливі рідкі та пастоподібні системи (емульсії, суспензії, концентрати) [18, 23]. Для умов невеликої продуктивності особливий інтерес становлять малогабаритні сушильні апарати з дисковим пристроєм розпилення, що поєднують компактність, відносно просту експлуатацію та можливість формувати дрібнодисперсний потік краплин із контрольованим розміром [6, 7, 28, 43]. Низка сучасних досліджень підтверджує, що дискове розпилення дозволяє отримувати краплини заданого діаметра, що безпосередньо впливає на швидкість сушіння, однорідність структури та якість порошку [1, 6, 7, 43].

Водночас ефективність застосування малогабаритних сушильних апаратів з дисковим пристроєм розпилення на підприємствах малої потужності значною мірою визначається правильним вибором продукту для сушіння. В'язкість, тепло- і масообмінні характеристики, поверхневий натяг, вміст сухих речовин і початкова вологість впливають на можливість формування стабільного факела розпилення, запобігання злипання частинок і забезпечення рівномірного висушування [6, 7, 17, 18, 23]. Порівняльні огляди сушіння рослинної та іншої сировини показують, що оптимальні режими сушіння, а також доцільність використання розпилювальної технології істотно залежать від групи продукту, його структурних і реологічних властивостей [17, 18, 23].

Попри значний обсяг робіт, присвячених конструкціям дискових розпилювачів і режимам розпилення, в науковій літературі практично відсутні систематизовані критерії й алгоритми вибору продуктів для сушіння саме в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим пристроєм розпилення на підприємствах малої потужності. Немає узгодженого підходу до класифікації продуктів за придатністю до такого способу сушіння з урахуванням їхніх фізико-хімічних, реологічних і споживчих характеристик, а також обмежень, пов'язаних з масштабом виробництва.

Це все зумовлює наукову та практичну актуальність дослідження, спрямованого на обґрунтування особливостей вибору продукту для сушіння в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим пристроєм розпилення на підприємствах малої потужності, що має забезпечити можливість цілеспрямованого використання таких установок для розширення асортименту порошкоподібних харчових інгредієнтів і підвищення ефективності роботи малих виробництв.

Мета досліджень: обґрунтування вибору продукту, придатного для сушіння в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилювачем та визначення інженерних підходів до розрахунку параметрів дискового розпилювача і теплотехнічних характеристик сушильної камери для умов малих виробництв.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є малогабаритний розпилювальний сушильний апарат з дисковим розпилювачем, а також харчові продукти (овочево-фруктові пюре, настої, концентрати), зокрема для крафтових виробництв, відібрані за фізико-хімічними показниками та чутливістю до нагрівання. Дослідження виконано як аналітико-розрахункове і включало: аналітичний огляд та узагальнення літературних даних щодо придатності продуктів до розпилювального сушіння і конструкцій малогабаритних сушильних апаратів; інженерне обґрунтування параметрів

дискового розпилювача та сушильної камери на основі типових розрахункових підходів; порівняльне оцінювання придатності різних продуктів до сушіння методом дискового розпилення за сукупністю технологічних і ринкових критеріїв.

Для порівняльного оцінювання сформовано групи критеріїв: фізико-механічні властивості; придатність до дискового розпилення на дисках малого діаметра; можливість роботи з невеликими партіями; комерційний потенціал; регуляторна простота та безпечність. Кожен критерій оцінювали за п'ятибальною шкалою (1...5), після чого обчислювали інтегральний індекс придатності продукту (*I*) як зважене середнє:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{m} w_i s_i}{\sum_{i=1}^{m} w_i}, \quad (1)$$

де m — кількість критеріїв; s_i — бал за i-м критерієм; w_i — ваговий коефіцієнт критерію.

У базовому варіанті приймали рівні ваги критеріїв ($w_i = 1$), тоді *I* відповідає середньому арифметичному балів за всіма критеріями. Для зменшення суб'єктивності оцінювання застосовували уніфікований опис рівнів шкали для кожного критерію та узгоджували бальні оцінки з літературними даними і технологічними обмеженнями дискового розпилення в малогабаритних сушильних апаратах.

Результати дослідження. Сучасні огляди з технології розпилювального сушіння свідчать, що цей метод є одним із базових для перетворення рідких та пастоподібних харчових продуктів у порошки: молока, сироватки, кави, чайних екстрактів, фруктово-овочевих соків, ароматизаторів, функціональних напоїв тощо [35, 41]. Для підприємств малої потужності (фермерські та крафтові цехи, мініпереробки) розпилювальне сушіння є привабливим завдяки можливості швидко перетворювати обмежені партії сировини на стабільні, транспортабельні та високовартісні продукти з доданою цінністю.

У промислових розпилювальних сушильних апаратах широко застосовують дискові (роторні) розпилювачі, оскільки вони забезпечують [36, 41]:

- формування тонкодисперсного факела крапель у широкому діапазоні витрат;
- працездатність із більш в'язкими системами та суспензіями;
- відносно стабільний розподіл крапель за розміром, що є критичним для керованого процесу сушіння та формування властивостей порошку.

Для малогабаритних сушильних апаратів на підприємствах малої потужності характерні менші діаметри дисків — порядку 50...100 мм проти 120...250 мм у промислових апаратах, менші витрати сировини та повітря, а також підвищена варіативність продуктів при роботі з малими й сезонними партіями. Це зумовлює додаткові вимоги до продукту:

- можливість подачі на диск звичайними харчовими насосами при помірній в'язкості;
- відсутність великих твердих включень і грубих волокон, які можуть порушувати рівномірність подачі та спричиняти дисбаланс ротора;
- регульована масова частка сухих речовин (для малих дисків бажаний діапазон, який забезпечує стійку кромкову плівку без надмірного збільшення розміру крапель);
- стабільність суспензії протягом часу обробки невеликої партії;
- мінімальна схильність до сильного налипання на елементах сушильної камери, де можливості інтенсивного механічного очищення обмежені.

Отже, для нашого завдання доцільно обирати саме продукти у вигляді соків/пюре, концентратів чи суспензій, які:

- можуть подаватися на диск насосом при регульованій в'язкості;
- містять термолабільні біологічно активні речовини (вітаміни, поліфеноли, каротиноїди), збереження яких виправдовує застосування розпилювального сушіння;
- мають реальний і перспективний ринок саме в порошковій формі для малих і крафтових виробництв.

Світова практика показує, що порошки з фруктів та овочів, отримані розпилювальним сушінням, є одним із найдинамічніших сегментів інгредієнтів для харчової промисловості. Вони використовуються у [2, 3, 12, 29, 35, 36, 41]: напоях і сухих сумішах для відновлення; кондитерських виробах, десертах, морозиві; соусах, супах, спеціях; хлібобулочних та снекових виробах.

Такі порошки, зазвичай, одержують шляхом розпилювального сушіння соків, пюре або концентратів з додаванням носіїв (мальтодекстрин, модифікований крохмаль, інулін тощо) для зниження гігроскопічності та липкості [2, 3, 35, 41]. Експериментальні дослідження науковців [2, 12, 29], демонструють, що при правильному підборі складу носія і режимів сушіння можна отримати порошки з низькою вологістю, задовільною сипкістю, доброю розчинністю та прийнятним ступенем збереження вітаміну С, кольору й ароматичного профілю.

Для підприємств малої потужності в Україні (малі цехи з переробки овочів і фруктів, крафтові пекарні та ін.) це відкриває можливість переробляти сезонні надлишки сировини в порошки, що: мають тривалий термін зберігання; легко транспортуються навіть на великі відстані; можуть бути використані як універсальні інгредієнти в різних видах продукції (хліб, снеки, напої, начинки).

При цьому невеликі партії, характерні для таких виробництв, добре узгоджуються з продуктивністю малогабаритних сушильних апаратів із дисковими розпилювачами малого діаметра.

Для малих і крафтових хлібопекарських виробництв особливий інтерес становлять овочево-фруктові порошки як функціональні інгредієнти. Дослідження [28] показало, що використання суміші плодово-овочевих порошків із подрібненим насінням льону: підвищує вміст харчових волокон, мінеральних речовин та антиоксидантів; покращує пористість м'якушки й структурно-механічні властивості; сприяє подовженню строків зберігання виробів.

Авторами підкреслено, що овочево-фруктові порошки є зручним шляхом включення локальної рослинної сировини (гарбуз, морква, буряк, яблуко, ягоди) до рецептур хліба, що особливо актуально для крафтових міні-пекарень, орієнтованих на унікальні та функціональні продукти [28]. Огляд авторів [16] підтверджує, що добавка фруктово-овочевих побічних продуктів (висівки, вичавки, сушені пюре) у хлібобулочні вироби підвищує вміст клітковини та поліфенолів і покращує антиоксидантну активність без суттєвого погіршення органолептичних показників за умови раціонального дозування.

Це безпосередньо узгоджується з концепцією підприємств малої потужності, які, працюючи з обмеженими обсягами, прагнуть розширити асортимент саме за рахунок нішевих, функціональних продуктів на основі локальної сировини.

Нові дослідження демонструють можливість створення комплексних порошків на основі поєднання фруктів і бобів/злаків для функціональних напоїв. Так, автори [20] одержали композитний порошок «обліпиха — біб» шляхом розпилювального та сублімаційного сушіння з використанням мальтодекстрину та інуліну як носіїв. Показано, що порошки зберігають високий вміст фенольних сполук, антиоксидантну активність та мають добрі органолептичні характеристики, а розпилювальне сушіння

за оптимальних умов забезпечує прийнятну розчинність і стабільність продукту [20]. Подібні результати підтверджують, що рослинні суміші у формі суспензій або пюре є технологічно придатними для розпилювального сушіння, а отримані порошки мають високий потенціал як інгредієнти для функціональних напоїв, каш, снеків і хлібобулочних виробів [20, 35, 41].

Окремий перспективний напрям крафтового сектору — порошки з крафтового пива та його побічних продуктів. Автори [42] показали, що при переробці крафтового пива на порошок методом розпилювального або сублімаційного сушіння вдається концентрувати фенольні сполуки та леткі компоненти, отримуючи продукт із збереженим ароматичним профілем і антиоксидантною активністю. Паралельно в численних оглядах розглядається пивна дробина як джерело харчових волокон, білка та поліфенолів для хлібобулочних виробів, снеків, екструдованих продуктів [8, 13, 25].

Однак для малогабаритних сушильних апаратів із диском 50...100 мм на підприємствах малої потужності існують важливі обмеження:

- крафтове пиво містить етанол і CO_2, що ускладнює роботу невеликої сушильної установки (вентиляція, вибухопожежна безпека, регулювання режиму сушіння);

- пивна дробина є твердим волокнистим матеріалом із високою вологістю, який потребує попередньої механічної/термічної обробки (віджим, подрібнення, екстрагування) перед можливим розпилювальним сушінням екстрактів. Це значно ускладнює схему для малого виробництва, тому з позицій простоти реалізації в малогабаритних сушильних апаратах і універсальності застосування порошку більш доцільним є акцент на фруктово-овочеві соки/пюре.

У результаті аналітичного огляду сучасних підходів до сушіння харчових продуктів і потреб підприємств малої потужності було сформовано перелік потенційних продуктів, придатних для отримання з них порошку методом розпилювального сушіння з використанням дискового розпилювача малого діаметра (50...100 мм). До переліку увійшли: солоні та смакові основи (соєвий соус, овочеві бульйони); фруктово-овочеві соки й пюре (гарбуз, буряк, яблуко, морква, томат тощо); рослинні напої, екстракти пряно-ароматичної сировини, дріжджові суспензії; носії (розчини мальтодекстрину) та інші харчові системи.

Вибір продукту для сушіння в малогабаритних сушильних апаратах та врахування специфіки таких апаратів здійснювався за такими групами показників:

- фізико-механічні властивості (в'язкість у робочому інтервалі концентрацій, відсутність великих включень, стабільність суспензії);

- придатність до дискового розпилення на дисках діаметром 50...100 мм (формування рівномірної плівки, стабільність факела, прогнозований розмір крапель);

- можливість роботи з невеликими партіями (типова сезонна доступність, технологічна гнучкість, мінімально доцільний обсяг партії);

- комерційний потенціал для підприємств як малої потужності в Україні, так і крафтових (наявний попит, можливість позиціонування як нішевого продукту, інтеграція в існуючі рецептури);

- регуляторна простота та безпечність (відсутність додаткових вимог щодо поводження з алкоголем, алергенами, токсичними компонентами).

Порівняльне оцінювання придатності продуктів до сушіння в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилення виконували за методикою, наведеною в розділі «Матеріали і методи» (п'ятибальна шкала за визначеними критеріями та інтегральний індекс I як узагальнений показник).

У табл. 1 наведено частину результатів аналізу для найбільш перспективних продуктів.

Таблиця 1. **Оцінка перспективних продуктів для сушіння в малогабаритних апаратах з дисковим пристроєм розпилення**

Продукт	Категорія	Інтегральна оцінка (*I*) (1...5)	Коротка характеристика продукту
Гарбузове пюре	Овочі/ фрукти	4,6	Помірна, добре регульована в'язкість; пюре легко гомогенізувати й профільтрувати до відсутності грубих волокон. Інтенсивний колір і смак, високий вміст каротиноїдів. Добре підходить для невеликих партій сезонної сировини
Яблучний сік/пюре	Фрукти	4,5	Низька/середня в'язкість, можливість роботи як із соком, так і з пюре. Сировина масово доступна в Україні, стабільна з року в рік. Порошок універсальний для напоїв, начинок, хлібобулочних і кондитерських виробів
Буряковий сік/пюре	Овочі	4,3	Порівняно низька в'язкість, але висока інтенсивність кольору; необхідне ретельне фільтрування для видалення грубих часток. Порошок виступає натуральним барвником і функціональним інгредієнтом для хліба, снеків та соусів
Соєвий соус	Солоні основи	4,1	Відносно низька в'язкість, добра розчинність. Пізніше потребує уваги до корозійної стійкості обладнання (високий вміст солі). Перспективний для малих виробників соусів та HoReCa, але менш універсальний у хлібопекарському використанні
Овочевий бульйон	Солоні основи	4,0	Середня в'язкість при концентраціях, придатних для сушіння; можливе налипання через вміст білків і жиру. Цікавий для виробництва супових концентратів і харчових сумішей в сегменті малих цехів та HoReCa

За інтегральною оцінкою найбільш пріоритетними для сушіння в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилення є гарбузове пюре (4,6), яблучний сік/пюре (4,5) та буряковий сік/пюре (4,3). Їх перевага зумовлена поєднанням керованих фізико-механічних властивостей після стандартної підготовки та високого потенціалу використання порошків у рецептурах малих виробництв. Продукти типу соєвого соусу (4,1) та овочевого бульйону (4,0) доцільні переважно для сегменту приправ/основ (HoReCa) і менш універсальні для широкого спектра виробів.

Як видно з табл. 1, соєвий соус та овочевий бульйон мають досить високі значення інтегральної оцінки і можуть розглядатися як перспективні продукти для створення порошкових приправ і основ для HoReCa. Проте для завдань, пов'язаних із хлібобулочними та кондитерськими виробами малих виробництв, вони є менш універсальними й потребують специфічного позиціонування.

Натомість гарбузове, яблучне та бурякове пюре/сік демонструють: високу сумарну придатність до розпилення в малогабаритних сушильних апаратах (через керовану в'язкість, відсутність грубих включень після стандартної підготовки, прийнятну стабільність суспензії); відповідність масштабу невеликих партій — більшість українських виробників мають сезонні надлишки гарбуза, яблук і столового буряка, які економічно доцільно перетворювати на порошки; високий комерційний потенціал

для підприємств малої потужності та крафтових виробництв (порошки можуть вводитись у рецептури хліба, булочок, снеків, сухих сумішей для випічки та напоїв, а також у дитяче та дієтичне харчування).

Провівши оцінку та аналіз ринку України для вибору перспективних продуктів для сушіння, доцільно обрати два-три продукти для подальших досліджень та інженерних розрахунків.

Гарбузове пюре. Україна має значні обсяги вирощування гарбуза, в тому числі для переробки та дитячого харчування. Пюре має помірну, добре регульовану в'язкість, легко гомогенізується та фільтрується, що є важливим для стабільної роботи дисків діаметром 50...100 мм.

Отриманий порошок є яскравим за кольором, збагаченим каротиноїдами та харчовими волокнами, і може використовуватися у крафтових хлібобулочних, кондитерських виробах та сухих сумішах [16, 28, 35].

Яблучний сік/пюре. Україна традиційно є великим виробником яблук, для малих переробників характерні сезонні надлишки сировини.

Сік і пюре мають сприятливі реологічні властивості для малих дискових розпилювачів, концентрація сухих речовин легко регулюється, що дозволяє узгодити в'язкість із режимними параметрами апарата [2, 3, 35, 41]. Порошок яблучного соку/пюре є універсальним інгредієнтом із високою споживчою привабливістю, застосовується в напоях, начинках, хлібобулочних і кондитерських виробах, що вигідно для підприємств малої потужності.

Буряковий сік/пюре. Столовий буряк є масовою культурою для України. Значна частина урожаю може бути використана для виробництва натуральних барвників та функціональних інгредієнтів.

Буряковий сік/пюре після подрібнення та фільтрації характеризується прийнятною в'язкістю й може стабільно подаватися на дисковий розпилювач. Порошок буряка виконує функцію натурального барвника та джерела біоактивних речовин, що дозволяє малим виробникам створювати хліб, снеки й соуси з вираженими кольором та функціональністю без використання штучних добавок [16, 28].

Сукупність цих факторів дозволяє зробити висновок, що гарбузове пюре, яблучний сік/пюре та буряковий сік/пюре є технологічно та економічно доцільними продуктами для сушіння в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим пристроєм розпилення на підприємствах малої потужності в Україні (у тому числі крафтових виробництвах).

Додатково для гарбузового пюре, бурякового соку/пюре та яблучного соку/пюре проаналізовано їхні фізико-механічні характеристики, важливі для роботи малогабаритних сушильних апаратів з дисковими розпилювачами.

За даними [10] для гарбузового пюре вихідні показники становлять: pH ≈ 4,35 та вміст розчинних сухих речовин 7,2 ± 0,3 °Brix. В інших дослідженнях, присвячених напоям на основі гарбуза, наведено вміст розчинених сухих речовин в гарбузовому пюре на рівні ≈ 11,7 °Brix та pH ≈ 6,3, що відображає варіацію показників залежно від сорту й технології підготовки сировини [35, 41].

Реологічні вимірювання показали, що гарбузове пюре має псевдопластичну поведінку з межею текучості та добре описується моделлю Гершеля-Балклі. При нагріванні від 60 до 100 °C значення коефіцієнта консистенції зменшуються, а показник течії зростає, що відповідає зниженню в'язкості та «розрідженню» структури [10]. Це безпосередньо важливо для дискового розпилення, оскільки попередній підігрів до

60...70 °С дозволяє зменшити навантаження на насос і підвищити стабільність подачі на диск.

Таким чином, гарбузове пюре з вмістом розчинних сухих речовин близько 7...12 °Brix і помірною в'язкістю при 60—70 °С (після попередньої гомогенізації) відповідає вимогам продукту для розпилювального сушіння [10, 35, 41].

Для буряка особливий інтерес становить не лише колір й антиоксидантна активність, а й реологічні властивості. Дослідження авторів щодо впливу екстракту на фізичні властивості соку з коренеплодів буряка показали, що динамічна в'язкість бурякового соку змінюється в широкому діапазоні 0,77...28,4 МПа·с залежно від вмісту сухих речовин (порядку 10...50 °Brix) та температури 10...60 °С [30]. Підвищення температури призводить до експоненційного зниження в'язкості, тоді як збільшення концентрації екстракту — до її зростання, що є типовим для овочевих соків.

Отже, для використання в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилювачем доцільно працювати з буряковим соком/пюре в інтервалі вмісту сухих речовин близько 10...20 °Brix і з підігрівом до 50...60 °С, що забезпечує оптимальну в'язкість і полегшує формування дрібнодисперсного факелу. Такі режими узгоджуються з рекомендаціями щодо підготовки фруктово-овочевих соків до розпилювального сушіння [10, 30, 35, 41].

Для яблучних соків і концентратів накопичено значний масив даних. Аналіз соків, проведений авторами [32], показав, що вміст розчинних сухих речовин у промислових яблучних соках становить переважно 11,0...12,4 °Brix, що відповідає вимогам європейських стандартів для натуральних соків. Для тих самих зразків було встановлено [32]: густина 1,046...1,078 г/см³ (тобто 1046...1078 кг/м³) при 20 °С; динамічна в'язкість 1,56...5,79 МПа·с залежно від сорту, ступеня освітлення та виробника.

За іншими даними [15], в'язкість яблучного соку зростає від 1,71 МПа·с при 10 °Brix до 3,65 МПа·с при 20 °Brix. Моделювання, проведене авторами [5], показало, що у діапазоні 14...39 °Brix і 20...80 °С в'язкість та густина яблучного соку добре описуються багатопараметричними рівняннями як функції температури й концентрації.

Таким чином, яблучний сік з вмістом сухих речовин ≈ 11...12 °Brix, густиною близько 1,05...1,08 г/см³ і в'язкістю 2—6 МПа·с при 20 °С є реологічно придатним для подачі на дисковий розпилювач без додаткового розведення, особливо за умови підігріву до 40...60 °С.

Патентні й оглядові джерела з технології розпилювального сушіння вказують, що для стабільної роботи традиційних розпилювачів (у тому числі дискових) в'язкість живильної суспензії зазвичай повинна знаходитись у діапазоні приблизно 10...300 МПа·с, залежно від конструкції та режиму [39]. Для малих дисків діаметром 50...100 мм, які застосовуються в малогабаритних сушильних апаратах, доцільно орієнтуватися на нижню частину цього спектра, що досягається за рахунок: обмеження вмісту сухих речовин (для соків і пюре — як правило, 10...20 °Brix без урахування носіїв); попереднього підігріву продукту до 50...70 °С; гомогенізації та фільтрації для усунення великих включень, здатних викликати розбалансування диска й налипання.

Типові діаметри краплин при дисковому розпиленні харчових продуктів за даними оглядових праць щодо розпилювального сушіння становлять 10...200 мкм, що відповідає діапазону для більшості харчових порошків [35, 41]. Це узгоджується з вимогами до структури порошків для хлібопекарських та снекових сумішей.

Аналіз ринку малогабаритних розпилювальних сушильних апаратів показує, що для невеликих харчових підприємств в тому числі і крафтових виробництв найбільш поширені установки з:

- продуктивністю за випареною вологою 0,5...10 кг/год;
- діаметром камери приблизно 0,5...1,2 м;
- загальною висотою 1,8...2,5 м;
- встановленою потужністю 3...20 кВт.

Такі параметри мають, зокрема, промислові моделі з дисковими розпилювачами типу LPG-3/5 [21], а також лабораторні/пілотні розпилювальні сушильні установки продуктивністю 0,5...10 л/год для молока, соків, екстрактів тощо [14].

Тому для невеликих підприємств і крафтових виробництв доцільно вважати малогабаритними розпилювальними сушильними апаратами з такими орієнтовними параметрами: продуктивність за випареною вологою 1...8 кг/год; діаметр сушильної камери 0,6...1,2 м, висота до 2,5 м; можливість гнучко змінювати вхідну температуру повітря в діапазоні 80...220 °C (для термолабільних продуктів — робота на нижній межі); дисковий розпилювач зі швидкістю обертання 10000...25000 об/хв і діаметром диска 50—100 мм (для продуктивності 3...8 кг/год) [21, 24, 26, 33].

Узагальнення даних для молочних продуктів показує, що типові вхідні ($t_{вх}$) температури теплоносія 150...220 °C та вихідні ($t_{вих}$) 70...100 °C забезпечують потрібну вологість порошку при прийнятних показниках якості [22, 31, 34].

Для фруктово-овочевих соків та пюре рекомендовано [4, 35, 40] температуру теплоносія: $t_{вх}$ = 140...180 °C, $t_{вих}$ = 65...80 °C. Ці параметри мінімізують деградацію кольору, ароматичних і антиоксидантних компонентів, особливо за наявності носіїв (мальтодекстрин 10...20% від маси сухих речовин) [35, 40].

Для рослинних екстрактів, солодових і хмелевих продуктів доцільні режими з $t_{вх}$ = 150...190 °C, $t_{вих}$ = 70...85 °C, з урахуванням термостійкості ефірних олій та поліфенолів [9, 19].

За даними оглядових робіт, для дискових розпилювачів характерні [24, 26, 33]: швидкість обертання диска у межах 10000...30000 об/хв; середній діаметр крапель — 30...120 мкм; зворотна залежність діаметра краплі від швидкості обертання та діаметра диска.

У спрощеному вигляді залежність середнього діаметра крапель (d) можна представити [1, 26, 33]

$$d = k\left(\frac{\sigma}{\rho\,\omega^2 D}\right)^{0,5}, \tag{2}$$

де σ — поверхневий натяг, Н/м; ρ — густина рідини, кг/м^3; ω — кутова швидкість, с$^{-1}$; D — діаметр диска, м; k — коефіцієнт, що враховує конструкцію розпилювача. На практиці для харчових рідин досягають $d \approx 40$—80 мкм для більшості продуктів крафтових виробництв.

Для малогабаритних сушильних апаратів з продуктивністю 3...8 кг/год доцільно приймати діаметр диску — 0,05...0,08 м, число обертів у межах 18000...25000 об/хв, що забезпечує утворення дрібних крапель з часом сушіння 3...8 с у камері діаметром 0,8...1,2 м [21, 33].

Для узагальненого розрахунку сушильних апаратів використовують класичні співвідношення (у спрощеному вигляді):

- матеріальний баланс —

$$G_{пов}(x_2 - x_1) = G_{рід}(W_1 - W_2), \tag{3}$$

де $G_{пов}$ — масова витрата теплоносія, кг/с; x_1, x_2 — початковий та кінцевий вологовміст повітря, кг/кг; $G_{пр}$ — витрата продукту, W_1, W_2 — масові частки вологи в продукті до та після сушіння, %;

- тепловий баланс —

$$G_{пов}c_{пов}(t_{вх} - t_{вих}) = G_{пр}\left[r(W_1 - W_2) + c_{пр}\left(t_{к\ пр} - t_{вх\ пр}\right)\right], \qquad (4)$$

де r — прихована теплота випаровування, Дж/кг; $t_{вх\ пр}$, $t_{к\ пр}$ — початкова та кінцева температура продукту, °С; $c_{пов}$, $c_{пр}$ — теплоємність повітря і продукту, Дж/(кг×°С).

На основі узагальнення літературних даних [3, 4, 22, 26, 31, 34, 35, 40] сформовано орієнтовні діапазони параметрів для сушіння в малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилювачем трьох типових груп продуктів (табл. 2).

Таблиця 2. **Параметри сушіння продуктів у малогабаритних сушильних апаратах з дисковим розпилювачем**

Група продукту	Приклади	Вміст сухих речовин, %	Температура теплоносія, °С		Діаметр крапель, мкм	Особливості
			$t_{вх}$	$t_{вих}$		
1. [5—7] Фруктово-ягідні соки та пюре	Яблучне, смородинове, малинове пюре, соки з м'якоттю	15...30 (з додаванням 10...20% мальтодекстрину)	140...180	65...80	40...70	Висока схильність до липкості, необхідні носії, контроль вологості повітря та $t_{вих}$
2. [4, 13, 14] Молочні напої, сироватка, козине молоко	Сухі суміші для напоїв, ферментовані напої, сироватка	30...50	150...200	75...90	50...100	Вимоги до розчинності, миттєвого відновлення
3. [2, 9] Рослинні екстракти, солодові та хмелеві продукти, соуси	Екстракти хмелю, солодові концентрати, соуси, маринади	20...45	150...190	70...85	40...80	Чутливість до деградації ароматичних речовин, доцільні м'які режими та інертні/зволожені гази

На основі аналізу промислових, малогабаритних та лабораторних установок для розпилювального сушіння [14, 20, 21, 35, 41, 43] можна виділити декілька конструктивних рішень, адаптованих під невеликі витрати сировини на підприємствах малої потужності, в тому числі і крафтових виробництв:

1. Горизонтальний диск у компактній циліндричній камері. Диск діаметром 50—100 мм розміщують у верхній частині камери, подача гарячого повітря (теплоносія) — прямотоково з потоком краплин зверху вниз. Така схема мінімізує налипання на стінках, придатна для продуктів з вмістом сухих речовин 10...20 °Brix (яблучний, гарбузовий, буряковий сік/пюре), що є класично для сушильних апаратів з дисковим розпилювачем.

2. Швидкохідний диск у камері з розширеним нижнім конусом. Для продуктів з дещо вищою в'язкістю (пюре гарбуза) доцільно використовувати диск малого діаметра (50...80 мм) з підвищеною швидкістю обертання, а геометрію камери виконувати з розширеною нижньою частиною. Подібні рішення застосовують у лабораторних і пілотних розпилювальних сушильних апаратах для фруктово-овочевих соків.

3. Малогабаритна камера з диском і вбудованою псевдозрідженою секцією досушування. Окремі конструкції поєднують дискове розпилення з локальною зоною псевдозрідження у нижній частині камери (малий шар, що обдувається гарячим повітрям). Це дозволяє працювати з дещо більшими краплинами й підвищеною вологістю на виході з зони диска, що цікаво для невеликих крафтових виробництв, де важлива гнучкість режимів.

Тому компактна циліндрична камера доцільна для рідких і мало в'язких продуктів із нижчим ризиком налипання та за потреби максимально простого компонування. Камера з розширеним нижнім конусом є більш прийнятною для густіших/пастоподібних систем, де важливо зменшити осадження частинок на стінках і забезпечити стабільність факела. Комбінування дискового розпилення з локальною секцією псевдозрідження доцільно розглядати для продуктів із підвищеною липкістю або коли потрібна додаткова «гнучкість» режимів і досушування (зокрема для крафтових виробництв).

З позицій досліджуваних продуктів можна відзначити, що гарбузове пюре й яблучний сік/пюре мають фізико-механічні характеристики, які вже докладно описані в контексті реології та термостійкості [5, 10, 15, 32] і добре вписуються у вимоги до застосування для розпилення дисками у малогабаритних сушильних апаратах. Буряковий сік/пюре, з огляду на широкий діапазон в'язкості й інтенсивне забарвлення, доцільно розглядати як перспективний об'єкт для подальших експериментальних досліджень режимів розпилення й налипання у камерах малого об'єму.

На підставі наведеного порівняльного оцінювання продуктів за сукупністю технологічних і практичних критеріїв та узагальнення конструктивних рішень сушильних камер для малогабаритних сушильних апаратів з дисковим розпиленням сформовано цілісну логіку попереднього проєктування (вибір продукту → вибір компоновки камери → обґрунтування параметрів диска і режимів сушіння), що може бути використана як інженерна основа для підприємств малої потужності при роботі з невеликими партіями сировини.

Перспективи подальших досліджень доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію запропонованої методики інтегральної оцінки (у т. ч. перевірку відтворюваності та, за потреби, введення вагових коефіцієнтів критеріїв), уточнення рекомендацій щодо вибору типу камери для продуктів із підвищеним ризиком налипання та різною реологією, а також на поглиблене обґрунтування параметрів диска малого діаметра (50...100 мм) і режимів теплоносія з урахуванням формування крапель, тепломасообміну та якості порошку (вологість, сипкість, розчинність) на пілотній/промислово-лабораторній установці.

Висновки. Сформовано групи критеріїв вибору продуктів для сушіння у малогабаритних сушильних апаратах з дисковим пристроєм розпилення, що поєднують технологічні та ринкові вимоги; запропоновано інтегральну оцінку придатності за п'ятибальною шкалою.

За результатами порівняльного оцінювання найбільш перспективними для малих виробництв визначено овочево-фруктові соки/пюре (зокрема гарбузове, яблучне та бурякове), які поєднують керовані реологічні властивості після стандартної підготовки та високий потенціал використання порошків у харчових технологіях.

Виділено типові конструктивні рішення сушильних камер для малогабаритних установок з дисковим розпилювачем (компактна циліндрична камера; камера з роз-

шириним нижнім конусом; камера з локальною секцією псевдозрідження для досушування), що можуть застосовуватись залежно від властивостей продукту та вимог до гнучкості режимів.

Показано доцільність поєднання підходів «вибір продукту → вибір режимів → обґрунтування параметрів диска і камери» як базової схеми попереднього проєктування малогабаритних розпилювальних сушильних апаратів для підприємств малої потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ahmed, M., Youssef, M. S. (2012). Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers. *Journal of Fluids Engineering*, 134(7), 071103. https://doi.org/10.1115/1.4006819.

2. Angel, R. C. M., Espinosa-Muñoz, L. C., Aviles-Aviles, C., González-García, R., Moscosa-Santillán, M., Grajales-Lagunes, A., Abud-Archila, M. (2009). Spray-drying of passion fruit juice using lactose-maltodextrin blends as the support material. *Brazilian archives of biology and technology*, 52(4), 1011—1018. https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000400026.

3. Barańska, A., Jedlińska, A., Samborska, K. (2023). Is it possible to produce carrier-free fruit and vegetable powders by spray drying? *Polish journal of food and nutrition sciences*, 73(3), 214—223. https://doi.org/10.31883/pjfns/168709.

4. Barańska-Dołomisiewicz, A., Żubernik, J., Samborska, K., Jedlińska, A., Witrowa-Rajchert, D. (2025). Effects of spray-drying conditions on the functional and physicochemical properties of young barley leaf juice powders. *Foods*, 14(10), 1663. https://doi.org/10.3390/foods14101663.

5. Bayindirli, L. (1992). Mathematical analysis of variation of density and viscosity of apple juice with temperature and concentration. *Journal of food processing and preservation*, 16(1), 23—28. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1992.tb00190.x.

6. Bernardo Monteiro, L., Maria De Almeida Coelho, N., Ramos Santos, A., Silva De Moraes, M., Moraes Junior, D. (2017). Atomization behavior as a function of the viscosity in a rotary disk spray dryer. *Chemical Engineering Transactions*, 7, 805—810. https://doi.org/10.3303/CET1757135.

7. Chen, J., Hu, W., Dong, X., Lin, J., Gao, Z., Qiu, B. (2024). Experimental Investigation on Modes of Spray Formation, Droplet Size and Size Distribution in a Spinning Disc Atomizer. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1470745. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1470745.

8. Chetrariu, A., Dabija, A. (2020). Brewer's spent grains: Possibilities of valorization, a review. *Applied Sciences*, 10(16), 5619. https://doi.org/10.3390/app10165619.

9. Dantas, A., Piella-Rifà, M., Costa, D. P., Felipe, X., Gou, P. (2024). 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.

10. Dutta, D., Dutta, A., Raychaudhuri, U., Chakraborty, R. (2006). Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of β-carotene in pumpkin puree. *Journal of food engineering*, 76(4), 538—546. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.056.

11. FAO. The state of food and agriculture 2023. Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. *Home Page*. URL: https://doi.org/10.4060/cc7724en (date of access: 13.01.2026).

12. Fathima, K. S., Fathima Rinshana, P., Rajesh, G. K., Shamna, N. P., Ajeeshkumar, K. K. (2025). Optimization of spray drying parameters for passion fruit juice powder: Physicochemical and quality evaluation. *Archives of current research international*, 25(9), 482—497. https://doi.org/10.9734/acri/2025/v25i91513.

13. Fernandes, P. C. B., Silva, J. (2025). Brewing by-products: source, nature, and handling in the dawn of a circular economy age. *Biomass*, 5(3), 49. https://doi.org/10.3390/biomass5030049.

14. Food Spray Dryer, Spray Drying Machine for Food Industry. *Pilotech*. URL: https://www.shpilotech.com/food-spray-dryer (date of access: 15.01.2026).

15. Genovese, D. B., Lozano, J. E. (2006). Contribution of colloidal forces to the viscosity and stability of cloudy apple juice. *Food Hydrocolloids*, 20(6), 221—230. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.07.003.

16. Gómez, M., Martinez, M. M. (2018). Fruit and vegetable by-products as novel ingredients to improve the nutritional quality of baked goods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(13), 2119—2135. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1305946.

17. Guiné, R. P. F. (2018). The drying of foods and its effect on the physical-chemical, sensorial and nutritional properties. *ETP International journal of food engineering*, 93—100. https://doi.org/10.18178/ijfe.4.2.93-100.

18. Khaing Hnin, K., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Zhu, Y. (2019). Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: A review. *Drying Technology*, 37(12), 1465—1480. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1510417.

19. Kumoro, A. C., Wardhani, D. H., Kusworo, T. D., Djaeni, M., Ping, T. C., Alhanif, M. (2024). A brief overview of spray drying technology and its applications. *Journal of human, earth, and future*, 5(2). https://doi.org/10.28991/HEF-2024-05-02-09.

20. Li, S., Fu, X., Wen, J., Jiang, L., Shao, L., Du, Y., Shan, C. (2024). Characterization of physico-chemical properties, bioactivities, and sensory attributes of sea buckthorn-fava bean composite instant powder: spray-drying versus freeze-drying coupled with carriers. *Foods*, 13(23), 3944. https://doi.org/10.3390/foods13233944.

21. LPG 5 Small Centrifugal Atomizer Spray Dryer — Buy LPG 5 spray dryer, centrifugal atomizer spray dryer, Used spray dryer Product on Changzhou Doing Machine Co., Ltd. *Paddle Dryer, Vacuum Dryer, Powder Mixer, Wet Granulator, Air Classifier Mill — Changzhou Doing Machine Co., Ltd*. URL: https://www.doingmachine.com/LPG-5-Small-Centrifugal-Atomizer-Spray-Dryer-pd44386575.html (date of access: 15.01.2026).

22. Masum, A. K. M., Chandrapala, J., Huppertz, T., Adhikari, B., Zisu, B. (2020). Influence of drying temperatures and storage parameters on infant milk formula powder. *Journal of food engineering*, 105, 109953. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104696.

23. Miletić, N., Nićetin, M. (2023). Food-drying applications for plant products: A comparative analysis. *Foods*, 12(20), 3739. https://doi.org/10.3390/foods12203739.

24. Mounika, E., Sivamma, P., Snehitha, R. (2021). Atomization techniques in spray drying: a review. *The Pharma innovation journal*, 10(5S), 454—461. https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue5S/PartG/S-10-5-37-495.pdf.

25. Nyhan, L., Sahin, A. W., Schmitz, H. H., Siegel, J. B., Arendt, E. K. (2023). Brewers' spent grain: an unprecedented opportunity to develop sustainable plant-based nutrition ingredients addressing global malnutrition challenges. *Journal of agricultural and food chemistry*, 71(28), 10543—10564. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02489.

26. O'Sullivan, J. J., Norwood, E.-A., O'Mahony, J. A., Kelly, A. L. (2019). Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: a review. *Journal of food engineering*, 243, 57—69. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.002.

27. OECD/FAO (2022). OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031, OECD Publishing, Paris. *Home Page*. URL: https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en (date of access: 13.01.2026).

28. Panasiuk, S., Taraymovych, I. (2022). Use of vegetable and fruit powders as innovative ingridients in the recipe of craft bakery products. *Commodity Bulletin*, 15(2), 49—62. https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-16-4.

29. Pedro, M. A. M., Telis-Romero, J., Telis, V. R. N. (2010). Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp powder. *Food Sci. Technol.*, 30(4), 993—1000. https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400024.

30. Peroń, S., Gryszkin, A., Surma, M. (2010). The impact of extract content on selected physical properties of garden beet juice and efficiency of its drying. *Agricultural Engineering (Inżynieria Rolnicza)*, 2, 103—110. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAR0-0050-0014/c/httpir_ptir_orgartykulypl120ir1202703pl.pdf.

31. Romo, M., Chutani, D., Fartdinov, D., Panthi, R. R., Vahedikia, N., Castellari, M., Felipe, X., Murphy, E. G. (2024). Pulse spray drying for bovine skimmed milk powder production. *Foods*, 13(6), 869. https://doi.org/10.3390/foods13060869.

32. Rydzak, L., Kobus, Z., Nadulski, R. et al. (2020). Analysis of selected physicochemical properties of commercial apple juices. *Processes*, 8(11), 1457. https://doi.org/10.3390/pr8111457.

33. Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., Gomes, P. S. (2018). Spray drying: an overview. *InTech.* https://doi.org/10.5772/intechopen.72247.

34. Schuck, P. (2002). Spray drying of dairy products: state of the art. *Lait*, 82(4), 375—382. https://doi.org/10.1051/lait:2002017.

35. Shishir, M. R. I., Chen, W. (2017). Trends of spray drying: a critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in food science & technology*, 65, 49—67. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006.

36. Spray Drying: Dryer, advantages and applications. ANDRITZ. *ANDRITZ GROUP*. URL: https://www.andritz.com/separation-en/insights/spray-dryers-guide (date of access: 13.01.2026).

37. SSFPA Women's Initiative. URL: https://women.ssfpa.net/wp-content/uploads/2022/06/SSFPA-Policy-Document.pdf (date of access:13.01.2026).

38. The African Climate Foundation. *Unlocking Green Development*. URL: https://africanclimatefoundation.org/wp-content/uploads/2025/09/801023_N-Food-processing-storage-and-packing-WEB-1-1.pdf (date of access: 13.01.2026).

39. US Patent 8 939 388 B1. Methods and apparatus for low heat spray drying. 2015. https://patents.google.com/patent/US8939388B1/en.

40. Verma, A., Singh, S. V. (2015). Spray drying of fruit and vegetable juices – a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(5), 701—719. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.672939.

41. Woo, M. W., Bhandari, B. (2013). Spray drying for food powder production. *In handbook of food powders: processes and properties*, 29—56. https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.29.

42. Zhong, L., Fu, Z., Bai, X., Zhu, H., Zhu, P., Huang, H., Liu, Y. (2023). Effect of spray-drying or freeze-drying on the physicochemical parameters, antioxidant activity, and volatile components of craft beer. *International journal of food science & technology*, 58(12), 6222—6233. https://doi.org/10.1111/ijfs.16702.

43. Бондарчук, Д. С., Якобчук, Р. Л. (2025). Аналіз конструкцій пристроїв розпилення апаратів для сушіння рідких харчових продуктів. *Харчова промисловість*, 37, 163—175. https://doi.org/10.24263/2225-2916-2025-37-18.

44. Сімахіна, Г., Науменко, Н. (2015). Інновації у харчових технологіях. *Товари і ринки*, 1, 189—201. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tovary_2015_1_24.