

УДК 66.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ РІДКИХ КОМПОЗИЦІЙ ГЕЙНЕРІВ НА КІНЕТИКУ ЇХ СУШІННЯ В СИСТЕМІ «КРАПЛЯ – ПАРОГАЗОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ»

Турчина Т.Я.¹, канд. техн. наук, Малецька К.Д.², докт. техн. наук, Авдєєва Л.Ю.³, докт. техн. наук,
Макаренко А.А.⁴, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹ст. наук. співр., ст. наук. співр., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²пров. наук. співр., ст. наук. співр., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-6150-5577>

³пров. наук. співр., ст. наук. співр., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

⁴ст. наук. співр., ст. докл tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.3>

В статті наведено результати експериментальних досліджень кінетики сушіння крапель рідких композицій гейнерів у системі «крапля – парогазове середовище». Композиції згідно вимог складаються з білків, жирів та вуглеводів у певних пропорціях. Вуглеводи представлені ди- і полісахаридами. Високий вміст вуглеводів визначив кінетику сушіння крапель цих продуктів як типових колоїдних рідин. Для них характерні різкі зміни форми та розмірів висушуваних крапель у стадії кипіння і подовження стадії досушування, що призводить до одержання збільшених за розмірами тонкостінних і пустотілих частинок. Усі висушені частинки композицій гейнерів у потоці теплоносія перебували у рухомому стані, а ті, що містять крохмаль, – у більшій мірі, і лише після охолодження до 20°C ставали твердими, міцними, а їх поверхня в результаті склування – глянцевою.

The article presents the results of experimental studies on the drying kinetics of gainer liquid composition droplets in the "droplet–steam–gas medium" system. According to the requirements, the compositions consist of proteins, fats, and carbohydrates in specific proportions. The carbohydrates are represented by di- and polysaccharides. The high carbohydrate content determined the drying kinetics of these droplets as typical colloidal liquids. They are characterized by sharp changes in the shape and size of the drying droplets during the boiling stage and by the extension of the final drying stage, which leads to the formation of enlarged thin-walled and hollow particles. All dried gainer composition particles in the heat carrier flow remained in a mobile state, and those containing starch were softer, becoming hard and strong only after cooling to 20 °C, while their surface, as a result of vitrification, became glossy.

Бібл. 26, рис. 4.

Ключові слова: композиція гейнера, крапля, температура теплоносія, кінетика сушіння.

С – масова частка сухих речовин, %;

Т – температура, °С;

τ – час, с;

υ – вологовміст, кг вол./кг сух.речов.

Індекси:

max g_{ig} – максимальний гігроскопічний;

дос – досушування;

заг – загальний;

к – крапля;

кип – кипіння;

кірк – кіркоутворення;

кр. 2 – друга критична крапка;

кр 3 – третя критична крапка;

0 – вихідний початковий;

п – теплоносій – повітря.

Постановка проблеми. Спортивне харчування здобуває все більшої популярності як серед професійних спортсменів, так і серед людей, які прагнуть до здорового способу життя. Деякі види спортивного харчування знаходять попит і серед військових. Підходи до створення технологій і складу спортивного харчування можуть бути корисними для розроблення раціонального харчування для забезпечення військовослужбовців комплексами речовин, необхідними для зміцнення здоров'я та попередження виникнення патологічних

станів. Раціональне збалансоване харчування – потужний фактор підвищення працездатності і прискорення відновлювальних процесів після тривалих та інтенсивних фізичних навантажень. Поживні і біологічно активні речовини, які входять до складу спортивного харчування можуть відігравати важливу роль у додатковому харчуванні військовослужбовців, особливо в умовах бойових дій, для підвищення витривалості, швидкого відновлення енергетичних витрат, посилення концентрації уваги [1, 2].

Одним із видів добавок для спортивного харчування з високою поживною цінністю, що може забезпечити повноцінне та збалансоване харчування є гейнери. Вживання гейнерів рекомендовано для швидкого поповнення енергетичних запасів організму і відновлення після тренувань. Гейнери мають високу калорійність і поєднують у складі білки, вуглеводи, вітаміни та мінерали, іноді невелику кількість жирів. Такі білково-вуглеводні концентрати (гейнери) здебільшого виробляються в сухій порошковій формі із застосуванням різних методів висушування. Сушіння методом розпилювання дозволяє отримати високу якість готової продукції, зберегти термолабільні речовини сировини і покращити мікробіологічні характеристики. Метод розпилювання дозволяє управляти дисперсійними, структурно-механічними, функціонально-технологічними та органолептичними характеристиками сухих порошоків. Перевагою таких технологій є контроль за гідротермічними і тепломасообмінними процесами на кожній стадії для одержання високої харчової і біологічної цінності готової продукції [3-6].

До складу композицій гейнерів входить значна вуглеводна складова з моно-, ди- і полісахаридів у поєднанні з білками різного амінокислотного складу і денатурації, а також термолабільні біологічно активні речовини. Багатокомпонентність сумішей вимагає вивчення теплофізичних особливостей процесу тепловологопереносу при зневодненні складної білково-вуглеводної дисперсної системи для розроблення енергоефективної технології якісного сухого порошкового продукту та зниження тепловитрат. Для визначення закономірностей тепловологопереносу при зневодненні дослідних зразків рідинних систем використовували метод дослідження кінетики випаровування і сушіння одиничних крапель в системі «крапля – парогазове середовище».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сухі порошкові багатокомпонентні суміші різного складу і призначення є найбільш поширеною формою спортивного харчування. Перевагами сухої форми таких продуктів є швидке відновлення, подовжений термін придатності, зручність умов транспортування і зберігання. При виробництві сухої форми багатокомпонентних продуктів спортивного харчування, зокрема, гейнерів, часто застосовується технологія «сухого змішування» попередньо висушених інгредієнтів [7-13]. Це дозволяє виробляти великий асортимент продукції, спрощує технологічний процес, знижує питомі витрати електроенергії на виробництво, не вимагає великих виробничих площ і використання спеціалізованого

високовартісного обладнання. Однак, властивості окремих компонентів можуть відрізнятися в залежності від використаної технології і режимів сушіння, що в свою чергу впливатиме на вихід, якість і безпечність отриманої готової продукції в цілому [7].

Метод розпилювального сушіння є універсальним для сушіння різноманітних багатокомпонентних рідинних дисперсних систем різної природи і широко використовується в харчовій, хімічній, фармацевтичній промисловості та ін галузях. Перевагами даного методу є висока продуктивність, порівняно висока економічність, короткочасність і щадність термічного впливу (декілька секунд) на матеріал при зневодненні у диспергованому стані (краплі мікронних розмірів). Видалення основної маси вологи з матеріалу при температурі «вологого» термометру дозволяє зберегти біологічно активні речовини і смакові властивості вихідної сировини. Метод дає можливість управляти якісними, структурно-механічними та органолептичними характеристиками отриманих сухих порошоків, а великий діапазон типорозмірів і продуктивності розпилювальних сушильних установок розширює можливості їх використання для підприємств різної потужності [3-5].

Технології розпилювального сушіння для багатьох складних багатокомпонентних харчових продуктів досить добре відомі і включають такі процеси, як попередня підготовка окремих компонентів, їх змішування і диспергування, пастеризація рідкої форми, згущення та сушіння [14, 15]. Перевагою застосування такої технології є контроль і відповідність кожного компоненту і кожної стадії технологічного процесу вимогам технологічного регламенту. Важливим фактором для забезпечення високої якості готового і відновленого продукту є послідовна термічна обробка рідкої багатокомпонентної суміші перед сушінням. Таким чином, виробник може гарантувати відповідність готового продукту показникам якості і безпечності. Продовжуються роботи над удосконаленням існуючих технологій для сушіння рідких дисперсних систем різного складу, особливостями структур і форм зв'язку води, що ускладнюють процеси вологоперенесення матеріалу при сушінні. Триває пошук нових конструктивних та технологічних рішень для зменшення енерговитрат, покращення умов протікання тепломасообмінних процесів та покращення властивостей отриманих продуктів [16].

Для збагачення продуктів оздоровчого і спортивного харчування (гейнерів) натуральними біологічно активними речовинами все більше використовують фруктові-овочеві або плодово-ягідні соки і пюре з метою покращення адаптації до тренувань, збільшення

продуктивності та швидкого відновлення [17, 18]. Харчові композиції збагачують овочевими, фруктовими і ягідними пюре з артишоку, спаржі, авокадо, моркви, селери, винограду та ін. видів рослинної сировини. Овочі і фрукти можуть відігравати важливу функціональну роль у здоровому та спортивному харчуванні завдяки вмісту макро- та мікроелементів, вуглеводів, клітковини, мінералів, вітамінів та низці біоактивних фітохімічних компонентів, включаючи фенольні сполуки, такі як антоціани, елаготаніни, ресвератрол та кверцетин. Відповідно до класифікації А.В. Ликова фрукти і овочі відносяться до колоїдних капілярно-пористих матеріалів, які містять різноманітні за хімічним складом і будовою компоненти із специфічними властивостями. Організація процесу їх сушіння з мінімальними втратами БАР залежить від теплофізичних властивостей всієї багатокомпонентної композиції і характеру взаємодії вологи зі каркасом структури молекул [16, 19]

Розпилювальне сушіння та інкапсулювання є поширеним та економічно ефективним методом захисту різноманітних біологічно активних сполук від інактивації і деградації, контролю або затримки їх вивільнення та маскування неприємних смаків чи запахів. Одержання таких порошкових продуктів (гейнерів) у мікрокапсульованій формі сприяє не тільки захисту біологічно активних та смакових (у т.ч. летких ароматичних) речовин вихідних інгредієнтів від термічного впливу при сушінні або від випаровування в процесі зберігання, але і покращує їх дифузію в процесі відновлення у воді. Склад і тип носіїв для побудови стінок є важливими для інкапсуляції та підтримки фізико-хімічних, структурних та функціональних аспектів мікрокапсул [20, 21]. Як показали дослідження мікрокапсульованих методом розпилювального сушіння порошкових продуктів, застосування мальтодекстрину (МД) з різними декстрозними еквівалентами (DE) у поєднанні з ізолятом сироваткового протеїну (у співвідношенні 4:1 відповідно) як стінкових структуроутворюючих матеріалів для інкапсуляції може уповільнювати дифузію (втрати) смакових (ароматичних) речовин за різних умов відносної вологості висушуваних крапель завдяки теплофізичній взаємодії між зосередженим всередині їх матеріалом та матеріалом зовнішньої стінки. При цьому, в процесі відновлення у воді завдяки високій розчинності МД відбувається швидке вивільнення смакових (ароматичних) речовин з висушених часток такого порошку. Завдяки цьому у відновленій емульсії органолептичні властивості відтворювались більшою мірою, а сама рідинна система швидко приходила до стану рівноваги. Проведені

дослідження механізмів консервування смаку під час розпилювального сушіння, зберігання та відтворення його під час відновлення у воді сприяли розумінню доцільності застосування саме мікрокапсульованої форми таких продуктів у харчових системах, як продуктів пролонгованої дії смакових (ароматичних) речовин у відновленому стані. Водночас, постійною проблемою ефективності розпилювального сушіння продуктів із високим вмістом складних полісахаридних комплексів є проблема поверхневої липкості сухих порошків, викликана адгезійними і когезійними властивостями сировини [22].

Як відомо [3–5], фізико-хімічним складом і теплофізичними властивостями компонентів рідинної системи визначається кінетика її сушіння, зокрема наявність окремих стадій і сумарна відносна тривалість зневоднення до крапки кр. 3 (момент завершення стадії кипіння), коли висушувані краплі досягають максимального гігроскопічного вологовмісту $u_{кр3} = u_{max.gig}$ [23]

Саме кінетичними характеристиками процесу зневоднення у третій критичній точці визначається температурно-вологісний та фізичний стан висушуваних крапель/частинок на виході із зони факелу розпилю: твердість і міцність їх структури або навпаки пластичність і схильність до адгезійної взаємодії з поверхнями камери та когезії [3, 4, 15]. Одержання такої інформації можливе виключно при дослідженні кінетики сушіння крапель дослідних колоїдних і гетерогенних систем у системі «крапля-парогазове середовище», тим більш, при наявності в їх складі фрагментів плодової сировини мікронних розмірів [3–5, 20].

З урахуванням того, що до складу продуктів спортивного харчування (гейнерів) входить значна масова частка вуглеводів, серед яких є і плодові добавки, доцільним було дослідити розроблені композиції як об'єкти розпилювального сушіння для визначення раціональних теплотехнологічних параметрів їх сушіння на промислових розпилювальних сушильних установках.

За теплофізичними і масообмінними властивостями окремі компоненти, використані в наших рецептурах білково-вуглеводної основи, є складними для сушіння матеріалами, які недостатньо досліджені, що вимагає додаткового поглибленого вивчення кінетики сушіння розроблених нами багатокомпонентних рідких композицій гейнерів.

Мета роботи полягала у проведенні досліджень кінетичних закономірностей сушіння в системі «крапля-парогазове середовище» рідких композицій гейнерів як потенційних об'єктів розпилювального сушіння для визначення раціональних теплотехнологічних параметрів їх сушіння.

Матеріали та методи досліджень. В дослідженнях використовувались три рецептури рідких композицій гейнерів (далі по тексту композицій). До їх складу увійшли, зокрема:

гідролізована форма ізоляту соєвого білку (Supro 500 E) згідно з ДСТУ 4595:2006;

гідролізована форма сироваткового білка;

концентрат сироваткового білку після ультрафільтрації (КСБ-70) згідно з ДСТУ 4458:2005. Концентрації білкові молочні. Технічні умови;

мальтодекстрин згідно з ДСТУ згідно з ДСТУ 4643:2006;

лецитин згідно з ДСТУ EN ISO 11701:2019;

крохмаль кукурудзяний згідно з ДСТУ 3976:2000;

сахароза згідно з ДСТУ 4623:2023;

гарбуз мускатного сорту «Медова красуня», що відповідає ДСТУ 3190-95 Гарбузи продовольчі свіжі. Технічні умови

Дослідні зразки гарбузового пюре були отримані шляхом миття, очищення, бланшування впродовж 20 хв. і гомогенізації в роторно-пульсаційному апараті (РПА) циліндричного типу.

Органолептичні і фізико-хімічні показники визначались за стандартними загальноприйнятими методиками.

Дослідження кінетики сушіння проводились в системі «крапля – парогазове середовище» на експериментальному стенді сушіння одиничних крапель рідинних дисперсних матеріалів у потоці теплоносія (повітря) нагрітого до температури 150 °С, 165 °С, 185°С. [3].

Викладення основних результатів досліджень. Досліджувалось 3 види рідких білково-вуглеводних композицій з гарбузовим пюре і вмістом сухих речовин $C_s \approx 40\%$, які відрізнялись за складом білків і вуглеводів. Білкові складові композицій у композиціях №1 і №2 представлені сироватковими білками та соєвим ізолятом у рівних частках, а в композиції №3 – сироватковим концентратом та гідролізатом соєвого ізоляту. До вуглеводного складу композицій у переважній кількості входили мальтодекстрин, сахароза (до 4–5%) та крохмаль кукурудзяний (в композиціях №2 – 5% та №3 – 3%).

Термограми сушіння $T_k=f(\tau)$ (рис. 1) крапель дослідних рідких композицій, одержані при температурі теплоносія $T_n=150^\circ\text{C}$, 165°C та 185°C , наведено на рис. 1. Близький характер термограм сушіння рідких композицій гейнерів обумовлений незначними відмінностями їх хімічного складу, а відсутність випарювального періоду пояснюється значним вмістом сухих речовин $\sim 40\%$. У зв'язку з цим процес зневоднення відбувається виключно у високотемпературному

сушильному періоді у три стадії: *кіркоутворення* (до $T_k=90-100^\circ\text{C}$), *кипіння* (при $T_k=90-100^\circ\text{C}$) та доволі тривалого *досушування* (при $T_k>100^\circ\text{C}$). Криві термограм сушіння композицій №1 та №3 (крива 1, крива 3) за усіх трьох температурних режимів майже співпадають, при цьому більш крутий підйом температури крапель на відміну від композиції №2 у стадіях кіркоутворення і досушування з короткочасною стадією кипіння є результатом більшої інтенсивності процесів тепломасопеносу при зневодненні крапель даних композицій.

Для композиції №2 (крива 2, рис.1) характерний дещо менший темп нагрівання крапель, удвічі більша тривалість стадії кипіння і більша за часом стадія досушування з частими викидами водяної пари.

За експериментальними даними, отриманими методом графо-цифрової обробки одержаних на експериментальному стенді в системі «крапля – парогазове середовище» термограм (рис. 1), були одержані кінетичні характеристики процесу сушіння крапель даних рідких композицій, представлені у формі графічних залежностей (рис. 2–4). Як видно з кривих $(dT/d\tau)_{\text{кірк}}=f(T_n)$ і $(dT/d\tau)_{\text{дос}}=f(T_n)$ (рис. 2), темп нагрівання крапель в стадії кіркоутворення (а) і досушування (б) з підвищенням температури теплоносія T_n від 150°C до 185°C збільшується в залежності від складу композицій. Так, у стадії кіркоутворення для композиції №2 темп нагрівання підвищується на $\sim 30\%$, для композицій №1 – на 40% , а для №3 – на 52% . В стадії досушування темп нагрівання крапель відбувається дещо інакше: для композицій №2 і №3 (криві 2 та 3) майже однаково – на $55-57\%$; а для №1 (крива 1) – на 60% .

Аналіз кривих $(dT/d\tau)_{\text{кірк}}=f(T_n)$ і $(dT/d\tau)_{\text{дос}}=f(T_n)$ (рис. 2) показує, що для композиції №2 в обох цих стадіях характерний найменший темп нагрівання ($4-6^\circ/\text{с}$ при $T_n=165-185^\circ\text{C}$), а найбільший: в стадії кіркоутворення – для композиції №3 (майже у 2 рази), що сприяло скороченню відносної її тривалості до значень $0,20-0,22$, а в стадії досушування – композиції №1 (у 1,5 рази).

За кривими $(dT/d\tau)_{\text{дос}}=f(T_n)$ (рис. 2, б) можна судити про здатність даних рідинних систем висушуватись до сухого стану. Судячи з розташування графічних залежностей $(dT/d\tau)_{\text{дос}}=f(T_n)$, серед трьох композицій саме композиція №1 більш придатна висушуватись методом розпилювання до стану сухого порошку з одержанням твердої та міцної структури частинок: крива 1 (рис. 2, б) розташована вище решти кривих. Візуалізація процесу на експериментальному стенді, одержані кінограми сушіння крапель даної композиції та дослідження фізичного стану висушених часток є тому ґрунтовним підтвердженням.

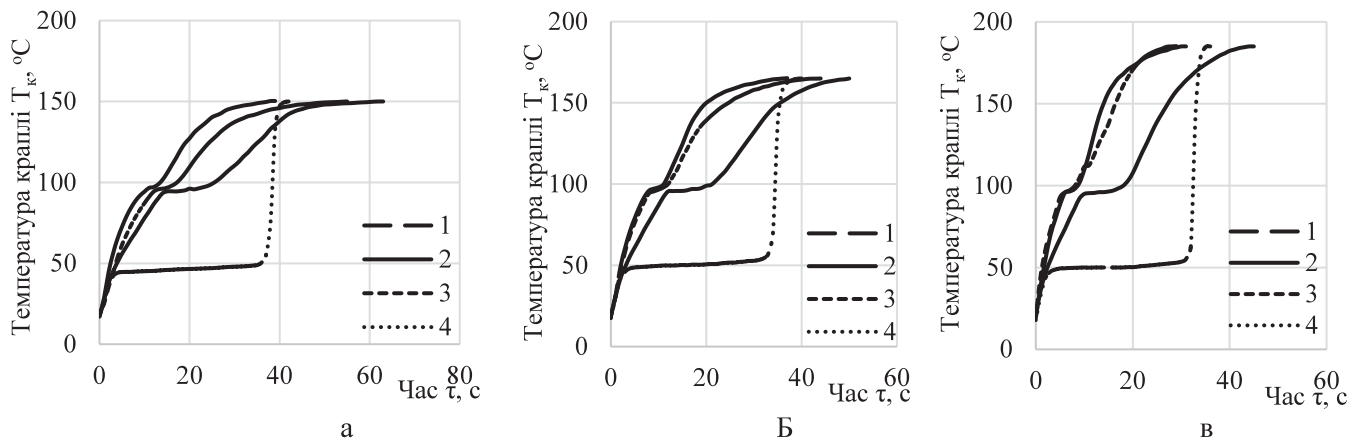


Рис. 1. Термограми сушіння крапель рідких композицій: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 та 4 – води при температурі теплоносія T_n : а) 150°C; б) 165°C; в) 185°C
Fig. 1. Drying thermograms of liquid composition droplets: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 and 4 – water. Inlet air temperature T_p : а) 150 °C; б) 165 °C; в) 185 °C

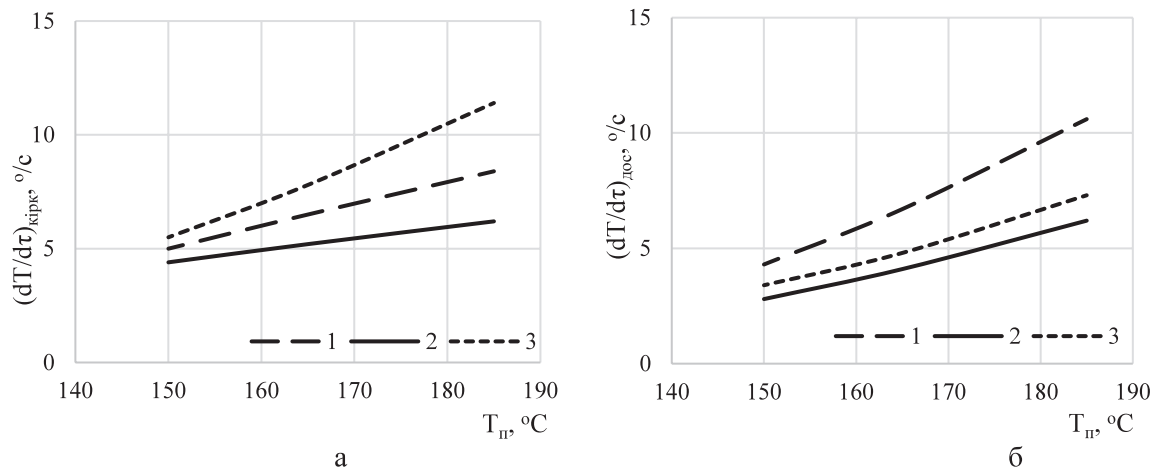


Рис. 2. Кінетичні залежності темпу нагрівання крапель композицій: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 у стадіях: а) кіркоутворення; б) досушування
Fig. 2. Kinetic dependencies of the heating rate of composition droplets: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 during the stages of: а) crust formation; б) final drying

Характерним для колоїдних розчинів, що містять мальтодекстрин та білки, є скорочення часу на утворення кірочки на поверхні крапель, що безумовно суттєво ускладнює процес вологопереносу через поверхню розділу фаз, якою є ущільнена поверхнева її оболонка. При $T_{кр} \approx 100^\circ\text{C}$ (відрізок термограми з майже горизонтальною поличкою) розчинник (вода) в краплі закипає (стадія кипіння), а через низьку дифузійну спроможність поверхневої оболонки процес її видалення гальмується. За таких умов внутрішній тиск водяної пари в краплі зростає, в результаті чого вона починає періодично роздуватись.

Однак, як видно з кривих $\tau_{кип}/\tau_{заг} = f(T_n)$ (рис. 3, а), відносна тривалість стадії кипіння для композицій №1 та №3 (криві 1 і 3) складала лише $\tau_{кип}/\tau_{заг} = 0,10-0,14$, а для композиції №2 (крива 2) – збільшилась до 0,2.

Як показують численні дослідження колоїдних розчинів та різних гетерогенних систем [4, 15], саме відносною тривалістю зневоднення крапель рідких систем до крапки кр.3 визначається ефективність висушування того чи іншого продукту та їх здатність висушуватись до сухого стану: чим більше значення $\tau_{кр.3}/\tau_{заг}$ (наприклад, 0,7–0,8, як при сушінні білкових розчинів

[24] або гарбузового пюре з білками або мальтодекстрином [25]), тим краще висушується продукт до низької кінцевої вологості, що важливо для зберігання високої якості порошку та ще й у сипкому стані.

Виходячи з того, що відносна тривалість зневоднення до крапки кр.3 при сушінні крапель рідких композицій гейнерів складається лише зі стадій кіркоутворення та кипіння:

$$\tau_{кр3} = \tau_{кр2} + \tau_{кип},$$

скорочення кожної з цих стадій закономірно призвело, як видно з кривих $\tau_{кр3}/\tau_{заг} = f(T_p)$ (рис. 3, б), до одержання занадто низьких значень – $\tau_{кр3}/\tau_{заг} = 0,31-0,43$ (криві 1, 2, 3), що характерно для складних колоїдних систем як об'єктів розпилювального сушіння. Це цілком узгоджується з результатами досліджень розчинів фосфоліпідів з введеним мальтодекстрином, для яких при $C_o = 40\%$ цей показник виявився ще нижчим – $\tau_{кр3}/\tau_{заг} \geq 0,2$, в результаті чого занадто великі значення $\tau_{дос}/\tau_{заг} \leq 0,8$ свідчили про високу вірогідність утримання всередині висушуваних часток залишків водяної пари і, як наслідок, перебування їх у потоці теплоносія у в'язко-пластичному стані і високого ризику адгезійних відкладень в камері розпилювальної сушарки [26].

Як показали візуальні спостереження та кінограми сушіння, під тиском водяної пари, яка затримувалась всередині крапель і після стадії кипіння, що особливо було характерно для композицій №2 та №3, краплі роздувались протягом усієї доволі тривалої, як видно з кривих $\tau_{дос}/\tau_{заг} = f(T_p)$ (рис. 4, а), стадії досушування. В

деяких краплях це супроводжувалось створенням так званого «кратера», через який відбувався стрімкий викид водяної пари з різким на цей момент зниженням температури краплі. За таких умов відносна тривалість стадії досушування для композицій гейнерів складала $\tau_{дос}/\tau_{заг} = 0,57-0,70$. Це пов'язано з переважним вмістом вуглеводів (наявний негативний вплив навіть 3–5% крохмалю у зразках №2 та №3) і браком частинок нерозчинних фракцій плодової (гарбузової) складової, здатних знижувати темп нагрівання крапель у стадії кіркоутворення, як показано в роботі [25], і, тим самим, подовжувати тривалість процесу вологопереносу крізь структуровану поверхню розділу фаз до крапки кр.3 і відповідно скорочувати тривалість стадії досушування.

Судячи з кривих $\tau_{заг} = f(T_p)$ (рис. 4, б), найменше часу на висушування витрачалось при зневодненні крапель композицій №1 (крива 1) та №3 (крива 3), що обумовлено більшим темпом їх нагрівання (рис. 1):

- при $T_p = 165^\circ\text{C}$ – 33 с і 39 с відповідно, що на 37% та 25% менше, ніж для крапель композиції №2;

- при $T_p = 185^\circ\text{C}$ – 28 с і 23 с відповідно, що у 1,5–2,0 рази менше, ніж для крапель композиції №2.

З підвищенням температури теплоносія від 150°C до 185°C загальний час висушування крапель усіх композицій гейнерів, як видно (рис. 4, б), закономірно скорочувався: для композиції №1 – на 25%, для композиції №2 – на 30%, а для композиції №3 – у 2 рази.

З аналізу кінетичних характеристик (рис. 2–4), візуальних спостережень і відеозаписів процесу сушіння, а також досліджень морфології висушених частинок для даних композицій з низькою дифузійною

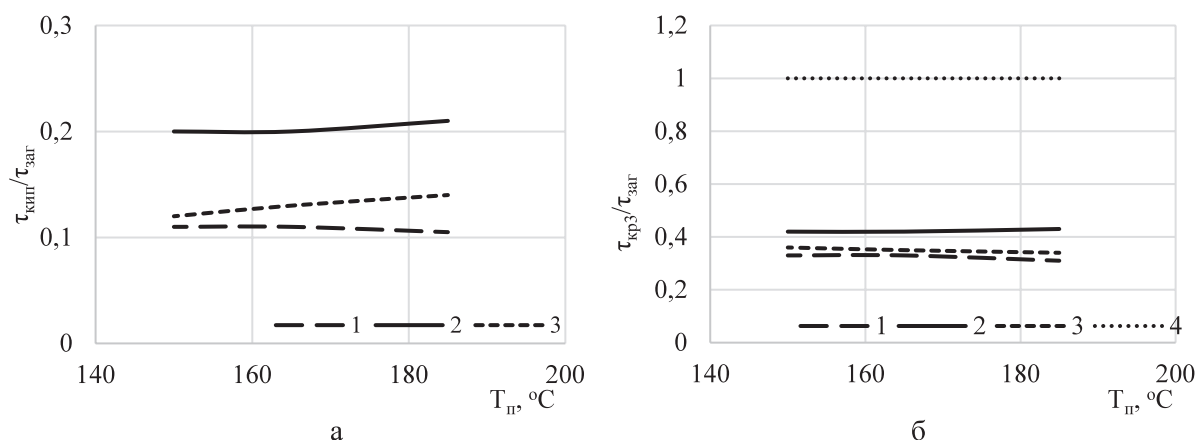


Рис. 3. Кінетичні залежності відносної тривалості: а) стадії кипіння, б) зневоднення до крапки кр.3 від температури теплоносія T_p крапель композицій: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 та 4 – води

Fig. 3. Kinetic dependencies of the relative duration of: a) the boiling stage, b) dehydration to the critical point 3, on the drying medium temperature (T_p) for composition droplets: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 and 4 – water

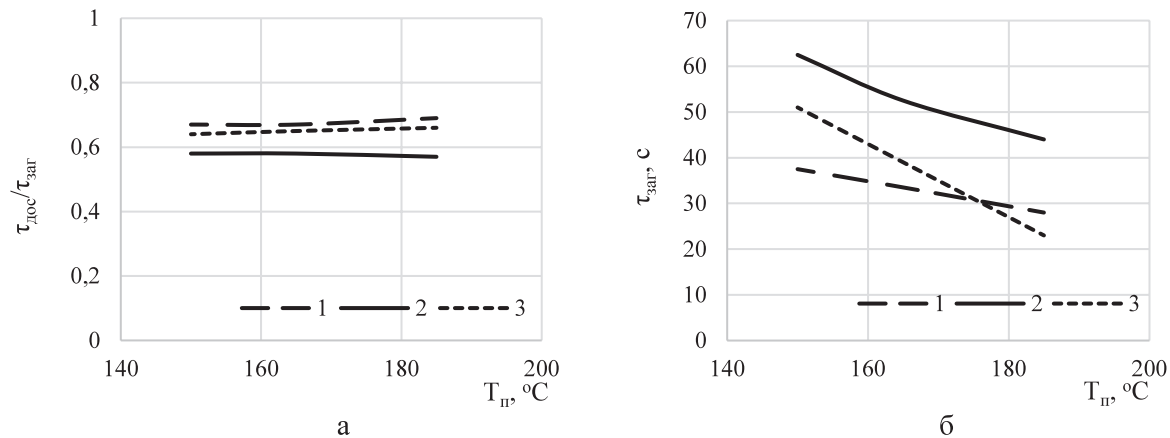


Рис. 4. Кінетичні залежності: а) відносної тривалості стадії досушування, б) загального часу зневоднення крапель композицій: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3 від температури теплоносія T_n

Fig. 4. Kinetic dependencies of: a) the relative duration of the final drying stage, b) the total dehydration time of composition droplets: : 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3, as a function of the drying medium temperature (T_n)

спроможністю поверхневої оболонки висушуваних крапель, схильність до роздування, особливо при $T_n=185^\circ\text{C}$, характерне одержання часток з тонкостінною порожньою структурою і розмірами значно більшими за початкові $\delta_{\text{кін}} \gg \delta_0$. Виходячи з динаміки зміни форми та розмірів крапель в процесі сушіння, розміри висушених часток перевищували початкові при $T_n=150^\circ\text{C}$ для композицій №1 та №2 – на 25–30%, при $T_n=165^\circ\text{C}$ – на 30% і 50% відповідно, при $T_n=185^\circ\text{C}$ – на 40% і 60% відповідно. Для композиції №3 незалежно від температури теплоносія кінцеві розміри висушених часток перевищували початкові у 1,5–2,0 рази. Найменший відсоток збільшення розмірів висушених часток характерний для композиції №1, до складу якої не входить крохмаль.

Як показали дослідження фізичного стану висушених часток, які проводились за допомогою тонкого металевого щупа, у потоці теплоносія більш твердими і міцними виявились частки композиції №1, висушені при $T_n=150\text{--}165^\circ\text{C}$, на відміну від значно більших за розміром часток зразків №2 і №3, висушених при $T_n=185^\circ\text{C}$, які у потоці теплоносія мали більш м'яку структуру і деформувались під тиском кінчика щупа і лише після охолодження поза межами потоку теплоносія до температури $20\text{--}30^\circ\text{C}$ набували твердості та міцності. Висушені і охолоджені частки мали суцільну глянцевою поверхню без ознак адгезійних властивостей.

Висновки. Проведені дослідження показали, що дослідні рідкі композиції гейнерів є типовими колоїдними системами, для яких характерним є швидке утворення на поверхні висушуваної краплі ущільненої

оболонки, яка чинить значний опір процесам вологопереносу при зневодненні, що обумовлює утворення порожнистих частинок збільшених розмірів тонкостінної структури з великою вірогідністю підвищеного вологовмісту і підвищеної адгезійної здатності в камері розпилювальної сушарки.

З досліджених зразків гейнерів найбільш придатною для одержання методом розпилювального сушіння високоякісного порошкового концентрату тривалого зберігання для людей з підвищеними фізичними навантаженнями (спортсменів, військових) виявилася композиція №1. За кінетичними характеристиками саме у цій композиції закладений більш ефективний при зневодненні структуроутворюючий комплекс, що сприяло значно меншим деформативним змінам форми та розмірів частинок в процесі сушіння та мікрокапсулюванню біоактивних складових композиції в процесі зневоднення під суцільною глянцевою оболонкою.

Встановлено, що для уникнення одержання пустотілих тонкостінних крихких часток процес розпилювального сушіння даної композиції доцільно проводити при температурі на вході в камеру не більш 180°C .

На виході з сушильної камери та поза її межами доцільне застосування системи охолодження порошку у режимі безперервного перемішування для надання більшої міцності часткам та кращої сипкоті порошку, що сприятиме своєчасному його вилученню з зони термічного впливу, збільшенню виходу порошкового продукту з сушарки та забезпеченню його високої якості.

ЛІТЕРАТУРА

1. McArdle W.D., Katch F.I., Katch V.L. Sports and Exercise Nutrition. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2008. 672 p.
2. Депутат Ю.М., Ричка О.В., Горишна О.В., Жалдак А.Ю. Оцінка стану здоров'я військовослужбовців як один з етапів нормування їх харчування. Український журнал військової медицини. 2022. Т. 3(2). С. 25-36.
3. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка : В 2-х т. Т. 1 Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. – Киев: Академперіодика, 2011. 376 с.
4. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка : В 2-х т. Т. 2 Теплотехнологии и оборудование для получения порошковых материалов. – Киев: Академперіодика, 2015. 390 с.
5. Малецька К.Д., Турчина Т.Я., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Інноваційна теплотехнологія виробництва сухої форми білково-фруктових композицій методом розпилювального сушіння. Наукові праці НУХТ. 2022. Том 28, № 4 С. 60–71. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-4-7>
6. Dantas A., Piella-Rifà M., Costa D.P., Felipe X., Gou P. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. Applied Food Research. 2024. Vol. 4, Iss. 1. 100382. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>
7. Soy/whey protein recovery composition. WO/2007/082267, 19.07.2007. International Application No. PCT/US2007/060393, International Filing Date 11.01.2007.
8. Pellegrino L., Hogenboom J. A., Rosi V., Sindaco M., Gerna S., D'Incecco P. Focus on the Protein Fraction of Sports Nutrition Supplements. Molecules. 2022. Vol. 27, Iss. 11. 3487. <https://doi.org/10.3390/molecules27113487>.
9. Massive gainer and preparation method thereof: CN106509857A China : IPC A23L33/00, appl. 15.09.2015; publ. 22.03.2017.
10. Composition for optimizing muscle performance during exercise : US6051236 USA: IPC A61K 31/195, A61K 31/41, A23L 1/29, appl. 12.11.1998; publ. 18.04.2000
11. Sports drink composition for enhancing glucose uptake into the muscle and extending endurance during physical exercise : US20060193949 USA : IPC A23L 1/29, publ. 31.08.2006.
12. All-natural drink composition for synthesizing and regenerating adenosine triphosphate (atp) in muscle cells and neurons, repairing exercise-induced muscle fiber damage, repletion of glycogen stores in the muscle and liver, enhancing blood flow to tissue during intense exercise, and preventing and reducing oxidative damage to tissues during exercise with minimal gastrointestinal disturbances: US20200054045 : USA : IPC A23L 2/395, A23L 2/66, A23L 33/155, appl. 28.10.2019; publ. 20.02.2020
13. Exercise drink composition, Композиція-напій для тренувань : WO2014028122 : IPC A23L 2/00, A23L 2/52, A23L 2/66, publ. 20.02.2014. https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2014028122&_cid=P11-LTE7VU-38553-1
14. Авдєєва Л. Ю., Декуша Г. В., Турчина Т. Я., Макаренко А. А. Особливості складу гейнерів як актуального виду спортивного харчування Наукові праці. 2025. Т. 88, № 1. С. 43–49. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2958>
15. Турчина Т.Я., Малецька К.Д., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Інтенсивність масопереносу при сушінні колоїдних розчинів та рідких гетерогенних систем. Наукові праці. 2023. Т. 87, № 1, С. 56-61. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2691>
16. Снежкін Ю.Ф., Шанарь Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини: Монографія.-К.: ТОВ «СІК ГРУПІ Україна», 2018. 228 с.
17. Chabib L., Trianloka A. M. B., Hidayat A. U. M. J., Awaluddin R., Firmansyah F. Potential tropical fruits to aid sports performance and its prospect to be developed into nano supplement // 1st International Conference on Environment, Sustainability Issues and Community Development (INCRID 2019), 23 October 2019, Semarang. – 2020. – Режим доступу: <https://ir.lib.ugm.ac.id/id/eprint/15216>
18. Puree compositions having specific carbohydrate ratios and methods for using same : CA2825207A1 Canada: IPC A23G3/48; A23G9/34; A23G9/42, A23L19/00, appl. 03.01.2013; publ. 07.11.2013
19. Naderi A., Rezaei S., Moussa A., Levers K., Earnest C. P. Fruit for sport. Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 74. P. 85–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.013>
20. Cheng X.D. Heat-Mass Transfer and Structure Formation During Drying of Single Food Droplets. Drying Technology. 2004. № 22(1,2). P. 179-190. <https://doi.org/10.1081/DRT-120028226>

21. Li K., Pan B., Ma L., Miao S., Ji J. Effect of Dextrose Equivalent on Maltodextrin/Whey Protein Spray-Dried Powder Microcapsules and Dynamic Release of Loaded Flavor During Storage and Powder Rehydration. *Foods*. 2020. Vol. 9, Iss. 12. 1878. <https://doi.org/10.3390/foods9121878>.
22. Buljeta I., Pichler A., Šimunović J., Kopjar M. Polysaccharides as carriers of polyphenols: comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. *Molecules*. 2022. Vol. 27, Iss. 16. Article 5069. <https://doi.org/10.3390/molecules27165069>
23. Шанар Р.О., Гусарова О.В. Вплив параметрів сушильного агента та умов зневоднення на кінетику волого обміну. *Галузеві дослідження ХХІ століття: аграрні науки, зоологія та ветеринарія, виробництво та технології: колективна монографія (1st edition)*, Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2022. – с. 74-80 (Обл.-вид. арк. 0,5). DOI:10.36074/hdsanzvvt.ed-1
24. Турчина Т.Я., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Декуша Г.В. Кінетика сушіння крапель розчинів сироваткового білку як структуроутворюючого компоненту для фруктово- та ягідно-білкових композицій. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2024. Т. 46, № 4. С. 42-50. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.5>
25. Турчина Т.Я., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Декуша Г.В. Дослідження впливу структуруючих добавок на кінетику сушіння крапель гарбузових композицій та фізичний стан висушених часток. *Наукові праці НУХТ*. 2025. Т.31, №2. С. 156-166. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-2-14>
26. Турчина Т.Я., Жукотський Е.К., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Вплив мальтодекстрину як структуруючої добавки на процес сушіння крапель емульсій з фосфоліпідними наноструктурами. *Промислова теплотехніка*. 2018. Т. 40, №4. С.19-24. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.03>

STUDY OF THE INFLUENCE OF GAINER LIQUID COMPOSITION ON THEIR DRYING KINETICS IN THE “DROPLET–VAPOR–GAS MEDIUM” SYSTEM

Turchyna T. Ya.¹, Maletskaya K.D.², Avdieieva L.Yu.³, Makarenko A.A.⁴

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine*

¹PhD (Engin.), Senior Research Scientist <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist <http://orcid.org/0000-0002-6150-5577>

³Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

⁴PhD (Engin.), Senior Researcher <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2026.3>

Considering today's wartime conditions in Ukraine, dry concentrates of sports nutrition (gainers) with a powerful protein–carbohydrate complex are advisable to use in the general therapy of severely wounded servicemen to increase the effectiveness of their treatment and accelerate recovery. Obtaining them by spray drying makes it possible to minimize thermal effects on thermolabile biologically active substances, particularly those derived from fresh fruit raw materials. The proteins and carbohydrates used in the proposed formulations, including pumpkin puree, represent insufficiently studied multicomponent heterogeneous systems, which should be additionally investigated as objects of spray drying.

The aim of the study was to examine the kinetic regularities of drying in the “droplet–steam–gas medium” system for liquid gainer compositions in order to determine the rational heat-technology parameters of their spray drying.

Research methods. The study used liquid gainer compositions that included proteins, fats, and carbohydrates in different proportions. The required consistency, containing particles of insoluble fractions $\leq 150\text{--}180\ \mu\text{m}$ from pumpkin puree (30% content in the compositions), was achieved by processing in a cylindrical-type rotary-pulsation apparatus. The drying kinetics of single droplets of the compositions were studied in the “droplet–steam–gas medium” system using an experimental setup in a heat-carrier flow heated

to 150 °C, 165 °C, and 185 °C. Based on experimental drying data (critical points and thermogram patterns), the corresponding kinetic dependences were constructed.

Results. The dehydration process of all three compositions occurred in the high-temperature drying period, which included the stages of crust formation, boiling, and final drying. According to the kinetic dependences of droplet heating rate: during crust formation, the heat–moisture transfer process in droplets of samples No. 2 and No. 1 proceeded under milder conditions, while during the final drying stage, sample No. 1 was able to dry at an accelerated rate. Shortening of the crust formation and boiling stages reduced the relative duration of dehydration up to the critical point cr.3 to values of 0.35–0.45 and significantly extended the final drying stage to 0.55–0.65, which is typical for colloidal systems. Rapidly formed dense shells on the droplet surface resisted moisture transfer, leading to the formation of hollow, thin-walled particles of enlarged size, especially at temperatures $\geq 180\ \text{°C}$, with a high probability of elevated moisture content and increased adhesiveness in the hot state.

Conclusions. The study showed that, as with typical colloidal systems, the proposed compositions are characterized by the low diffusion capacity of poorly permeable surface shells of drying droplets, which hinders moisture transfer and increases the risk of obtaining powder with elevated moisture content and adhesiveness in the hot state. The hollow structure of enlarged particles reduces the bulk density of the powder.

It was experimentally established that, among all the tested compositions, composition No. 1 was the most suitable for obtaining high-quality powder by spray drying. According to its kinetic characteristics, its structural protein–carbohydrate potential ensured reduced deformation of the particle shape during drying and smaller final particle size at 165–175 °C, while structural strengthening and the disappearance of adhesiveness were achieved after cooling due to the vitrification of sugary substances.

Ref. 26, figures 4.

Keywords: gainer composition, droplet, drying medium temperature, drying kinetics.

1. McArdle W.D., Katch F.I., Katch V.L. Sports and Exercise Nutrition. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2008. 672 p.

2. Deputat, Y.M., Rychka, O.V., Horishna, O.V., Zhaldak, A.Yu. Otsinka stanu zdorovia viiskovosluzhbovtiv yak ody z etapiv normuvannia yikh kharchuvannia [Assessment of servicemen's health as one of the stages of nutrition standardization]. Ukrainskyi zhurnal viiskovoi medytsyny [Ukrainian Journal of Military Medicine]. 2022. Vol. 3(2). P. 25–36. (in ukr.)

3. *Dolinskyi, A.A., Maletska, K.D.* Raspylytelnaia sushka: V 2-kh t. T. 1 Teplofizychni osnovy. Metody intensyfikatsii ta enerhozberezhennia [Spray drying: In 2 vols. Vol. 1. Thermophysical fundamentals. Methods of intensification and energy saving]. Kyiv: Akadempriodyka, 2011. 376 p. (in rus.)
4. *Dolinskyi, A.A., Maletska, K.D.* Raspylytelnaia sushka: V 2-kh t. T. 2 Teplotekhnologii ta obladnannia dlia otrymannia poroshkovykh materialiv [Spray drying: In 2 vols. Vol. 2. Heat technologies and equipment for producing powder materials]. Kyiv: Akadempriodyka, 2015. 390 p. (in rus.)
5. *Maletska, K.D., Turchyna, T.Ya., Avdiieva, L.Yu., Makarenko, A.A.* Innovatsiina teplotekhnologhiia vyrobnytstva sukhoi formy bilkovo-fruktovykh kompozytsii metodom raspylyvalnoho sushinnia [Innovative heat technology for producing dry forms of protein-fruit compositions by spray drying]. *Naukovi pratsi NUKhT [Scientific Works of NUHT]*. 2022. Vol. 28, No. 4. P. 60–71. (in ukr.) <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-4-7>
6. *Dantas A., Piella-Rifà M., Costa D.P., Felipe X., Gou P.* Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*. 2024. Vol. 4, Iss. 1. 100382. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>
7. *Soy/whey protein recovery composition.* WO/2007/082267, 19.07.2007. International Application No. PCT/US2007/060393, International Filing Date 11.01.2007.
8. *Pellegrino L., Hogenboom J. A., Rosi V., Sindaco M., Gerna S., D'Incecco P.* Focus on the Protein Fraction of Sports Nutrition Supplements. *Molecules*. 2022. Vol. 27, Iss. 11. 3487. <https://doi.org/10.3390/molecules27113487>.
9. *Massive gainer and preparation method thereof:* CN106509857A China : IPC A23L33/00, appl. 15.09.2015; publ. 22.03.2017.
10. *Composition for optimizing muscle performance during exercise :* US6051236 USA: IPC A61K 31/195, A61K 31/41, A23L 1/29, appl. 12.11.1998; publ. 18.04.2000
11. *Sports drink composition for enhancing glucose uptake into the muscle and extending endurance during physical exercise :* US20060193949 USA : IPC A23L 1/29, publ. 31.08.2006.
12. *All-natural drink composition for synthesizing and regenerating adenosine triphosphate (atp) in muscle cells and neurons, repairing exercise-induced muscle fiber damage, repletion of glycogen stores in the muscle and liver, enhancing blood flow to tissue during intense exercise, and preventing and reducing oxidative damage to tissues during exercise with minimal gastrointestinal disturbances:* US20200054045 : USA : IPC A23L 2/395, A23L 2/66, A23L 33/155, appl. 28.10.2019; publ. 20.02.2020
13. *Exercise drink composition,* Композиція-напій для тренувань : WO2014028122 : IPC A23L 2/00, A23L 2/52, A23L 2/66, publ. 20.02.2014. https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2014028122&_cid=P11-LTE7VU-38553-1
14. *Avdiieva, L.Yu., Dekusha, H.V., Turchyna, T.Ya., Makarenko, A.A.* Osoblyvosti skladu heineriv yak aktualnoho vydu sportyvnoho kharchuvannia [Features of gainer composition as a relevant type of sports nutrition]. *Naukovi pratsi [Scientific Works]*. 2025. Vol. 88, No. 1. P. 43–49. (in ukr) <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2958>
15. *Turchyna, T.Ya., Maletska, K.D., Avdiieva, L.Yu., Makarenko, A.A.* Intensyvni masoperenosu pry sushinni koloidnykh rozchyniv ta ridkykh heterohenykh system [Mass transfer intensity during drying of colloidal solutions and liquid heterogeneous systems]. *Naukovi pratsi [Scientific Works]*. 2023. Vol. 87, No. 1. P. 56–61. (in ukr) <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2691>
16. *Sniezhkin, Y.F., Shapar, R.O.* Teplomassobminni tekhnologhi pererobky pektynovmisnoi syrovyny: Monografiia [Heat and mass transfer technologies for processing pectin-containing raw materials: Monograph]. Kyiv: TOV «SIK GROUP Ukraina», 2018. 228 p. (in ukr.)
17. *Chabib L., Trianloka A. M. B., Hidayat A. U. M. J., Awaluddin R., Firmansyah F.* Potential tropical fruits to aid sports performance and its prospect to be developed into nano supplement. 1st International Conference on Environment, Sustainability Issues and Community Development (INCRID 2019), 23 October 2019, Semarang. 2020.
18. *Puree compositions having specific carbohydrate ratios and methods for using same :* CA2825207A1 Canada: IPC A23G3/48; A23G9/34; A23G9/42, A23L19/00, appl. 03.01.2013; publ. 07.11.2013
19. *Naderi A., Rezaei S., Moussa A., Levers K., Earnest C. P.* Fruit for sport. *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 74. P. 85–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.013>
20. *Cheng X.D.* Heat-Mass Transfer and Structure Formation During Drying of Single Food Droplets. *Drying Technology*. 2004. № 22(1,2). P. 179-190. <https://doi.org/10.1081/DRT-120028226>
21. *Li K., Pan B., Ma L., Miao S., Ji J.* Effect of Dextrose Equivalent on Maltodextrin/Whey Protein Spray-Dried Powder Microcapsules and Dynamic Release of Loaded Flavor During Storage and Powder Rehydration. *Foods*. 2020. Vol. 9, Iss. 12. 1878. <https://doi.org/10.3390/foods9121878>.

22. Buljeta I., Pichler A., Šimunović J., Kopjar M. Polysaccharides as carriers of polyphenols: comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. *Molecules*. 2022. Vol. 27, Iss. 16. Article 5069. <https://doi.org/10.3390/molecules27165069>
23. Shapar, R.O., Husarova, O.V. Vplyv parametriv sushynnoho ahenta ta umov znevodnennia na kinetyku volohoobminu [Influence of drying agent parameters and dehydration conditions on moisture exchange kinetics]. *Haluzevi doslidzhennia XXI stolittia: ahrarni nauky, zoolohiia ta veterenaryia, vyrobnytstvo ta tekhnolohii: kolektyvna monohrafiia* [Sectoral Research of the 21st Century: Agricultural Sciences, Zoology and Veterinary, Production and Technologies: Collective Monograph]. 1st edition. Vinnytsia: HO «Yevropeiska naukova platforma», 2022. P. 74–80. (in ukr)
24. Turchyna, T.Ya., Avdiieva, L.Yu., Makarenko, A.A., Dekusha, H.V. Kinetyka sushinnia krapel rozchyniv syrovatkovoho bilku yak strukturo-utvoriuiuchoho komponentu dlia fruktovo- ta yahidno-bilkovykh kompozytsii [Drying kinetics of whey protein solution droplets as a structure-forming component for fruit- and berry-protein compositions]. *Teplofizyka ta teploenerhetyka* [Thermophysics and Thermal Engineering]. 2024. Vol. 46, No. 4. P. 42–50. (in ukr) <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.5>
25. Turchyna, T.Ya., Avdiieva, L.Yu., Makarenko, A.A., Dekusha, H.V. Doslidzhennia vplyvu strukturoiuchykh dobavok na kinetyku sushinnia krapel harbuzovykh kompozytsii ta fizychnyi stan vysushenykh chastok [Study of the effect of structuring additives on the drying kinetics of pumpkin composition droplets and the physical state of dried particles]. *Naukovi pratsi NUKhT* [Scientific Works of NUHT]. 2025. Vol. 31, No. 2. P. 156–166. (in ukr) <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-2-14>
26. Turchyna, T.Ya., Zhukotskyi, E.K., Avdiieva, L.Yu., Makarenko, A.A. Vplyv maltodekstrynu yak strukturoiuchoi dobavky na protses sushinnia krapel emulsii z fosfolipidnymi nanostrukturamy [Influence of maltodextrin as a structuring additive on the drying process of emulsions with phospholipid nanostructures]. *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2018. Vol. 40, No. 4. P. 19–24. (in ukr) <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.03>

Отримано 03.10.2025

Received 03.10.2025

Прийнято до друку 05.02.2025
Accepted for publication 05.02.2025