

УДК 66.047

## КІНЕТИКА СУШІННЯ КРАПЕЛЬ РОЗЧИНІВ СИРОВАТКОВОГО БІЛКУ ЯК СТРУКТУРОУТВОРЮЮЧОГО КОМПОНЕНТУ ДЛЯ ФРУКТОВО- І ЯГІДНО-БІЛКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ

Турчина Т.Я.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Авдєєва Л.Ю.<sup>2</sup>, докт. техн. наук,  
Макаренко А.А.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, Декуша Г.В.<sup>4</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>1</sup>ст. наук. співр., старш. наук. співр. [tbds\\_itf@ukr.net](mailto:tbds_itf@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

<sup>2</sup>пров. наук. співр., ст. наук. співр. [tbds\\_itf@ukr.net](mailto:tbds_itf@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

<sup>3</sup>ст. наук. співр., [tbds\\_itf@ukr.net](mailto:tbds_itf@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

<sup>4</sup>ст. наук. співр., старш. докл., [tbds\\_itf@ukr.net](mailto:tbds_itf@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-8829-8221>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.5>

*В статті досліджено кінетику сушіння розчинів сироваткового білку у системі «крапля – паро-газове середовище». Встановлено, що більший вміст сухих речовин (10%) скорочує час сушіння крапель на 15% при підвищенні температури теплоносія від 140°C до 180°C. Основним чинником, що впливає на ефективність сушіння, є вміст сухих речовин. При цьому білки висушуються до сипкого порошку з низькою кінцевою вологістю.*

*The article investigates the drying kinetics of whey protein solutions in the "drop-vapor-gas medium" system. It was found that a higher content of dry substances (10%) reduces the drying time of droplets by 15% when the heat carrier temperature is increased from 140°C to 180°C. The main factor influencing drying efficiency is the dry matter content. Proteins dry into a free-flowing powder with low final moisture content.*

Бібл. 15, рис. 5.

**Ключові слова:** крапля, розчин, сироваткові білки, температура теплоносія, кінетика сушіння.

**Постановка проблеми.** Білок - це життєво важлива поживна речовина, яка необхідна не тільки для створення, підтримки і відновлення тканин, клітин і органів по всьому організму людини, а й для сприяння енергетичному обміну і клітинним процесам, захисту організму від хвороб шляхом коригування його імунної системи. Білки як незамінні високомолекулярні органічні речовини, що входять до складу клітин як зовнішніх структур (шкіри, волосся, нігтів), так і усіх внутрішніх органів, є найбільш поширеним сполуками в тілі людини після води, без яких існування людського організму неможливе і вимагає ретельного стеження за достатньою їх кількістю в раціоні харчування[1].

Для людей підвищених фізичних або екстремальних навантажень (військових, спортсменів, альпіністів, водолазів та ін.), тяжкохворих або важкопоранених в умовах активних бойових дій (прооперованих, понівечених і т.д.) споживання високобілкових продуктів і напоїв як складових комплексної терапії достатньо актуальне і край необхідне, оскільки сприяє швидкому відновленню і одужанню.

У зв'язку з цим створення продуктів оздоровчого і функціонального призначення з натуральної плодової сировини, якої в Україні вистачає, та білків підсирної сироватки вітчизняного виробництва набуває, на наш погляд, стратегічного значення і вимагає додаткових досліджень для визначення кінетики їх сушіння та переваг такого взаємозбагачувального поєднання в композиціях як об'єктів розпилювального сушіння[1,2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Всі білки - це полімери, мономерами яких є амінокислоти. В основному вони складаються з вуглецю, водню, кисню та азоту. У складі більшості досліджених білків всіх живих організмів було виявлено 20 амінокислот, що беруть участь в їх побудові[1, 3-5].

Білки (протеїни, поліпептиди) як головний будівельний матеріал в утворенні клітин, тканин і м'язів виконує ще й масу інших задач з підтримки життєдіяльності організму. Брак білку в раціоні викликає слабкість, запаморочення, безсоння, тривожний стан, депресію, в'ялість, зниження імунітету і опірності

різним вірусам та інфекціям, а в дітей і людей старшого віку – зниження мозкової діяльності і порушення діяльності деяких систем організму, зокрема, нервової. Тому, для уникнення ускладнень у стані здоров'я присутність білка в раціоні людини обов'язкова: щоденне споживання має становити 0,8-1,0г/кг ваги людини. При важких фізичних навантаженнях або заняттях силовими видами спорту кількість його як основного джерела росту і відновлення м'язів збільшується до 1,5-2.0г/кг ваги. При цьому треба врахувати, що не всі білки сприймаються організмом однаково і перетравлюються з однаковою швидкістю. Наприклад, яловичий білок перетравлюється швидко, проте засвоюється тільки 70% його корисних речовин. Сироватковий білок теж має швидку засвоюваність, при цьому організм сприймає його практично повністю – 90% від спожитої кількості [3].

**Концентрат сироваткових білків** (КСБ) має функціональні і оздоровчі властивості. Його біологічна цінність вище за інші білки. Продукт має високий вміст незамінних амінокислот, які сприяють синтезу м'язового білка. Основу КСБ складають сироваткові білки: бета-лактоглобулін, альфа-лактальбумін, альбумін сироватки крові, імуноглобуліни та компоненти протеозапептонної фракції. Концентрат сироватковий білковий, отриманий з молочної підсирної сироватки шляхом концентрування сироваткових білків з використанням методу ультрафільтрації («КСБ-УФ»), широко використовується як добавка у виготовленні харчових продуктів та продуктів дитячого харчування.

Використовуючи діафільтрацію, отримують КСБ з вмістом білка 80% від загальної маси сухих речовин. Поєднання мембранних методів обробки молочної сироватки дозволяє отримувати молочно-білкові концентрати з необхідними властивостями, вуглеводами і мінеральним складом. За схемою: ультрафільтрація – діафільтрація – електродіаліз можна виробляти концентрати з 90-95%-м вмістом і більше сироваткових білків з мінімальним вмістом лактози (0,5%) і мінеральних речовин (<0,3%). Застосування мембранних методів дозволяє виділяти сироваткові білки в нативному вигляді без використання хімічних реагентів та інших допоміжних вартісних матеріалів [6], що свідчить про доцільність використання такого продукту як носія і структуроутворювача у композиціях з плодовими сироватковими матеріалами.

Завдяки багатofункціональності, у т.ч. структуроутворюючим та термозахисним властивостям, білки молочної сироватки користуються попитом в якості

носія та інкапсулюючого засобу при розпилювальному сушінні термолабільних пробіотичних препаратів та харчових продуктів. Поєднання у деяких випадках сироваткових білків з мальтодекстрином сприяло одержанню значно більшому відсотку життєздатних живих організмів у висушеному в інкапсульованій формі порошку пробіотика і кращій його функціональності після висушування, підвищенню показників його розчинності та змочуваності [7].

Досвід заміни мальтодекстрину в композиціях з плодовою сировиною навіть на незначний відсоток (від 0,5-1,0% за сухими речовинами) ізоляту сироваткового білку показав, як це сприяє зменшенню поверхневого натягу полуничного поре, більшій міцності і монолітності висушених часток і зменшенню їх розмірів і, як результат, підвищенню ефективності висушування, більшому виходу порошку з камери та покращенню його якісних характеристик [8].

Враховуючи низьку температуру склопереходу цукрів, що містяться у плодовій сировині, і схильність їх до утворення пластичних мас на поверхні камери розпилювальної сушарки, що зменшує вихід порошку і погіршує його якість, досліджено вплив білкових та вуглеводних добавок на вихід порошку та його фізичні властивості. Показано, що ізолят молочного білка як матеріал-носії є більш ефективним відповідно до виходу продукту з сушарки в менших співвідношеннях з плодовою сировиною, ніж матеріали-носії на основі вуглеводів. [9]

Ринок сироваткових білків в Україні представлений широким асортиментом сухих концентратів, одержаних з застосування ультрафільтрації та сушіння, які добре розчиняються у воді, молоці, соках під час приготування коктейлів різноманітних смаків. До таких спеціальних білкових продуктів належать:

- **КСБ-УФ-65** - один з базових швидко засвоюваних білків (засвоюється організмом протягом години) використовуваних, як в чистому вигляді, так і в складних комплексних сумішах (міксах) з різним процентним його змістом;

- Біос (Техмолпром) **КСБ УФ 65%, КСБ УФ 70%** (м. Гадяч, Полтавська обл., Україна) – не поступається своїм іноземним аналогам. КСБ 65% відноситься до "швидких" протеїнів. Виробляється без добавок, зі смаком клубники, ванілі, банану, шоколаду, лісових ягід, карамелі [11, 12];

- **ProtéAlpine 80** (Франція) - концентрат сироваткового походження з сироватки, отриманої при виробництві двох якісних сирів: AOP Beaufort і IGP

Tomme de Savoie, без добавок. Порошок завдяки низькотемпературному процесу містить неденатурированні білки, багаті розгалуженими амінокислотами [13];

- **КСБ/WPC 80** – застосовується в харчовій промисловості, зокрема, підходить для дитячого, спортивного і медичного харчування [11];

- **Протеїнові коктейлі для спортсменів**, розроблені на основі КСБ та мальтодекстрину в залежності від часу їх прийому мають відповідні назви: «Ранковий», «Передтреніровочник», «Післятреніровочник», «Швидкий перекус» та «На ніч» і т.д.

Наведені дані свідчать про доцільність розширення асортименту порошкової форми відновлювальних продуктів (протеїнових коктейлів, батончиків, морозива або десертів) спеціального оздоровчого і функціонального призначення для різних верств населення, і, в першу чергу, військових, спортсменів, тяжкопоранених та ін., на основі КСБ-УФ і натуральної плодової сировини. Для одержання таких продуктів методом розпилювального сушіння важливо володіти знаннями кінетичних закономірностей сушіння крапель розчинів сироваткового білку як носія у складі фруктово- та ягідно-білкових композицій.

**Мета** роботи полягала у проведенні досліджень кінетики зневоднення одиничних крапель розчинів сироваткового білку у системі «крапля – парогазове середовище» у потоці нагрітого теплоносія.

**Матеріали і методи роботи.** У дослідження використувались розчини з вмістом сухих речовин 5% та 10%, які виготовлялись шляхом розчинення у воді порошкового концентрату сироваткового білка після ультрафільтрації (КСБ-УФ) згідно з ДСТУ 4458:2005.

Концентрати білкові молочні. Технічні умови.

Дослідження проводились на експериментальному стенді з вивчення процесу сушіння одиничних крапель розміром  $\approx 1,5$  мм рідинних систем у потоці нагрітого теплоносія [15.]

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів. На рис. 1 наведені термограми зневоднення одиничних крапель розчинів сироваткових білків з  $C_o=5\%$  і  $10\%$  при температурі теплоносія  $T_n=140, 160$  та  $180^\circ\text{C}$ .

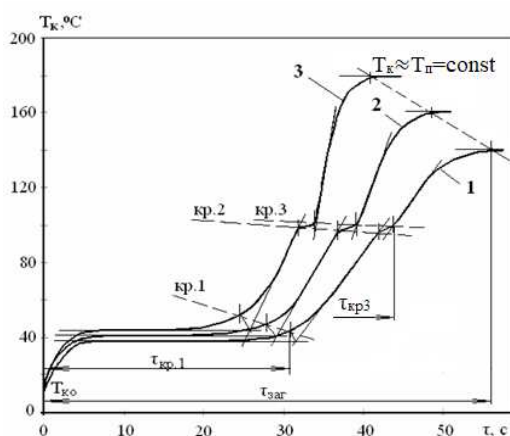
Процес зневоднення крапель КСБ обох розчинів, окрім крапель 10%-го розчину при  $T_n=180^\circ\text{C}$ , відбувається, як видно з термограм сушіння (рис. 1), у два періоди:

1. *випарювальному*, який включає стадію прогрівання краплі на початку процесу зневоднення та стадію випаровування вологи з вільної поверхні при температурі краплі, що відповідає температурі «вологого» термометру:  $T_k=38-42^\circ\text{C}$  ( $T_n=140^\circ\text{C}$ );  $40-44^\circ\text{C}$  ( $160^\circ\text{C}$ ) і  $42-47^\circ\text{C}$  ( $180^\circ\text{C}$ ).

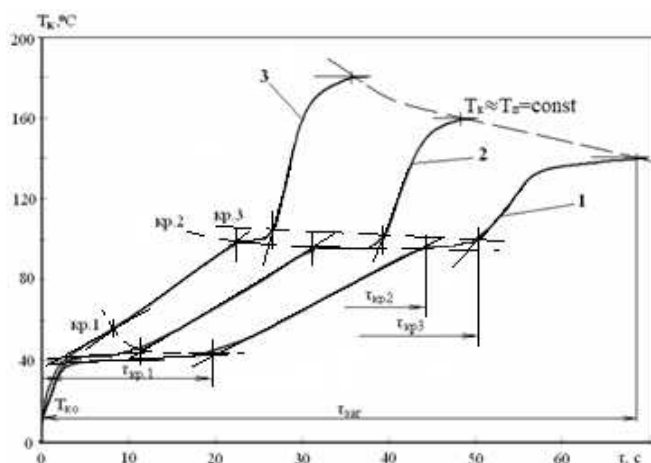
2. *сушильному*, який складається з трьох стадій:

- *стадії кіркоутворення*, виділеної на термограмах сингулярними крапками кр.1 та кр.2, яка протікає за умов зростання температури краплі, викликане виділенням на її поверхні зародків сухої фази, площа якої поступово нарощується по всій поверхні до утворення суцільної кірочки;

- *стадії кипіння*, виділеної на термограмах сингулярними крапками кр.2 та кр.3, коли температура краплі досягає температури кипіння розчину (води) під утвореною кірочкою при температурі  $100^\circ\text{C}$ ; у зв'язку з надто коротким у часі перебігом даної стадії вплив темпера-



а)



б)

Рис. 1. Термограми зневоднення крапель розчинів підсирної сироватки з вмістом сухих речовин  $C_o$ : а) 5% і б) 10% при температурі теплоносія  $T_n$ : 1 –  $140^\circ\text{C}$ ; 2 –  $160^\circ\text{C}$ ; 3 –  $180^\circ\text{C}$

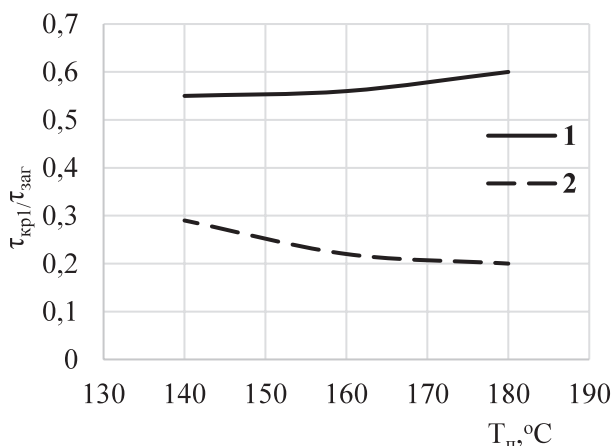
турних режимів або показників  $C_0$  на її тривалість у даних дослідженнях окремо не розглядався;

- стадії досушування, яка протікає від сингулярної крапки кр.3 на термограмах і до виходу температури краплі на рівень температури теплоносія  $T_k \approx T_n = \text{const}$ , що є ознакою завершеності процесу зневоднення.

Для 10%-го розчину КСБ характер термограм, як видно на рис.1 (б), істотно змінився. Якщо при менших з досліджених температур випарювальний період на термограмах присутній, хоча і скоротився при  $T_n = 140^\circ\text{C}$  до 37% від загального часу зневоднення і при  $T_n = 160^\circ\text{C}$  до 21%, то при  $T_n = 180^\circ\text{C}$  він відсутній взагалі. Тобто одразу після короточасного прогрівання краплі (крива 3, рис. 1, б) починається стадія кіркоутворення, що пов'язано з більш інтенсивним виділенням сухої фази на її поверхні.

За результатами цифрової обробки термограм зневоднення крапель даних розчинів КСБ (рис.1) були побудовані наступні кінетичні залежності від температури теплоносія:

- відносної тривалості випарювального періоду  $\tau_{\text{кр1}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$  (рис. 2);
- темпу нагрівання крапель у стадії кіркоутворення  $(dT/dt)_{\text{кірк}} = f(T_n)$  (рис. 3, а);
- темпу нагрівання крапель у стадії досушування  $(dT/dt)_v = f(T_n)$  (рис. 3, б);
- відносної тривалості зневоднення до крапки кр.3.  $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$  (рис. 4, а);
- відносної тривалості стадії досушування  $\tau_v/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$  (рис. 4, б);



**Рис. 2. Кінетичні залежності відносної тривалості випарювального періоду від температури теплоносія для крапель розчинів КСБ з  $C_0$ : 1 – 5%; 2 – 10%**

- загального часу зневоднення крапель розчинів білків сироватки (рис. 5).

За кінетичними залежностями (рис. 2) для 5%-го розчину КСБ випарювальний період в залежності від температурних умов складає 55-60% від загального часу зневоднення, що характерно для високовологих розчинів. Для 10%-го розчину КСБ характерне суттєве скорочення відносної тривалості випарювального періоду у порівнянні з 5%-м розчином: при  $T_n = 140^\circ\text{C}$  – на майже 30%; при  $160^\circ\text{C}$  – вже у 2,5 рази, а при  $180^\circ\text{C}$  – у 3 рази, що пов'язано з пришвидшенням процесу утворення сухої фази на поверхні крапель під впливом більш високих температур теплоносія.

Як видно з кінетичних кривих  $(dT/dt)_{\text{кірк}} = f(T_n)$  (рис. 3, а), темп нагрівання крапель 5%-го розчину білків сироватки (крива 1) у стадії кіркоутворення був у 3 рази вищий за темп нагрівання крапель 10%-го розчину (крива 2), а з підвищенням температури теплоносія від  $140^\circ\text{C}$  до  $180^\circ\text{C}$  – збільшився на 40%. Зазначене підвищення температури теплоносія не мало суттєвого впливу, як видно з того ж рис. 3 (а), на темп нагрівання крапель 10%-го розчину білків сироватки (крива 2) на цій самій стадії зневоднення: значення  $(dT/dt)_{\text{кірк}}$  збільшилось лише на 17%.

Суттєве зниження темпу прогрівання крапель 10%-го розчину КСБ у стадії кіркоутворення (крива 2, рис. 3, а), а також у стадії досушування: на 16% при  $T_n = 160^\circ\text{C}$  та на 27% при  $T_n = 180^\circ\text{C}$ , як видно з кінетичних кривих  $(dT/dt)_v = f(T_n)$  (крива 2, рис. 3, б), за умов дещо більшої відносної тривалості стадії досушування у порівнянні з 5%-м розчином, як видно з кривих  $\tau_v/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$  (крива 2, рис. 4, б) сприяє зниженню термічного впливу на матеріал, що висушується. Цей позитивним результатом як аргумент отримання порошкових продуктів високої якості методом розпилювального сушіння доцільно враховувати при створенні композицій з білків КСБ у поєднанні з фруктовими та ягідними сировинними матеріалами, що містять велику кількість термолабільних біоактивних речовин.

Виходячи з кінетичних залежностей  $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$  (рис. 4, а), показники відносної тривалості зневоднення крапель 5%-го та 10%-го розчинів КСБ до крапки кр.3 доволі близькі, достатньо високі і, зокрема, при  $T_n = 160-180^\circ\text{C}$  складають в межах  $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}} \geq 0,8$ . Такі високі показники  $\tau_{\text{кр3}}/\tau_{\text{заг}}$  характерні для рідких високовологих продуктів, які проявляють здатність до висушування до стану порошку низької кінцевої вологості і тривалого терміну зберігання. Підтвердження тому можуть бути, як видно з кінетичних залежностей  $\tau_v/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$  (рис. 4, б),

показники відносної тривалості стадії досушування для обох розчинів КСБ, які доволі близькі і за тих самих температур  $T_n=160-180^\circ\text{C}$  складають  $\tau_v/\tau_{\text{заг}} \approx 0,2$ .

Як видно з кривих  $\tau_{\text{заг}}=f(T_n)$  (рис. 5), збільшення темпу нагрівання крапель розчинів обох концентрацій у стадії досушування при підвищенні температури теплоносія від  $140^\circ\text{C}$  до  $180^\circ\text{C}$  (рис. 3. б) сприяло зменшенню загального часу їх зневоднення. Проте, підвищення температури теплоносія більш суттєво вплинуло на ефективність зневоднення крапель 10%-го розчину сироваткового білку, про що свідчать доволі високий відсоток тривалості зневоднення до крапки кр.3 при  $T_n=160-180^\circ\text{C}$  ( $\approx 80\%$ ), як вказувалось вище (крива 2, рис. 4, а), в результаті чого загальний час їх зневоднення скоротився на 45%, а 5%-го розчину КСБ – лише на 27%.

Виходячи з цього можна зробити висновок, що при розпилювальному сушінні фруктово- або ягідно-білкових композицій за більшого вмісту сироваткових білків у їх складі ( $\geq 50\%$  за С.Р.) саме цей додатковий час - до 15% від тзаг, як показано вище ( $\tau_{\text{заг}}=35\text{с.}$  - 10%-й і  $\tau_{\text{заг}}=41\text{с.}$  - 5%-й розчин КСБ при  $T_n=180^\circ\text{C}$ , рис. 5), дає потенційну можливість для покращення умов їх сушіння методом розпилювання і одержання високоякісних порошків низької кінцевої вологості, що сприятиме подовженню терміну їх зберігання у сипкому стані.

*Дослідження фізичного стану висушених крапель* (часток) проводились за допомогою тонкого металевого шупа у потоці високотемпературного теплоносія і після охолодження поза його межами  $20^\circ\text{C}$ . Експериментально встановлено, що незалежно від вмісту сухих

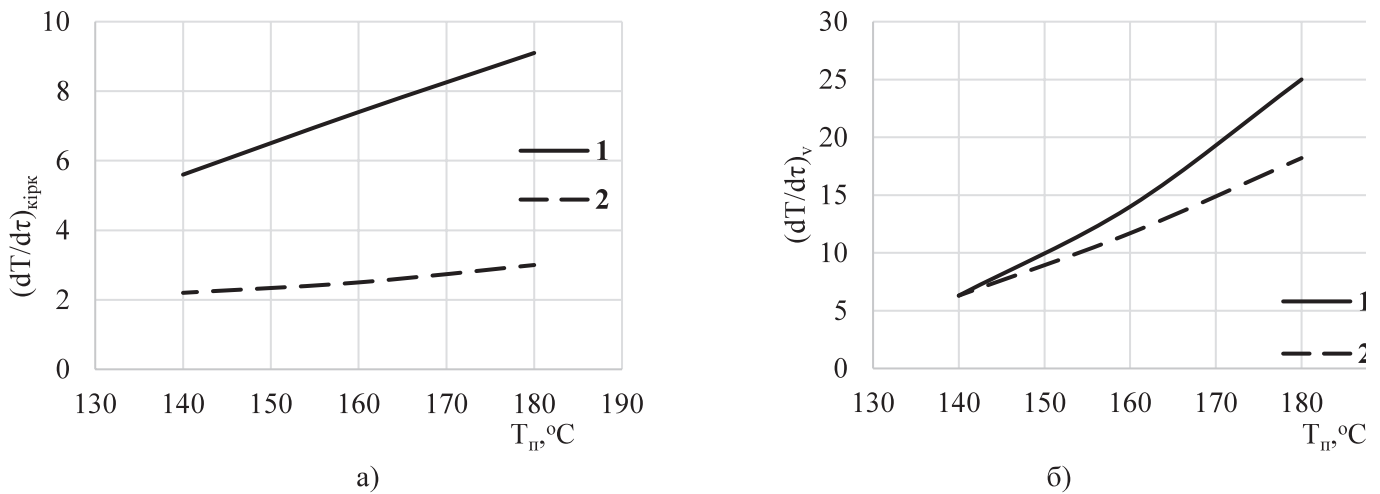


Рис. 3. Кінетичні залежності темпу нагрівання крапель розчинів КСБ з  $C_o$ : 1 – 5%; 2 – 10% у стадіях: а) кіркоутворення і б) досушування від температури теплоносія  $T_n$

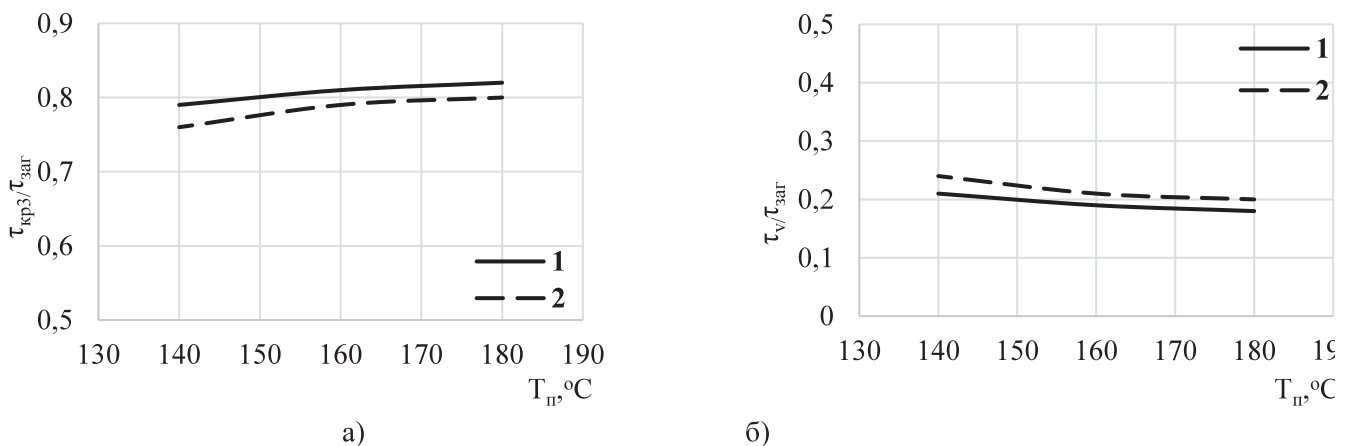


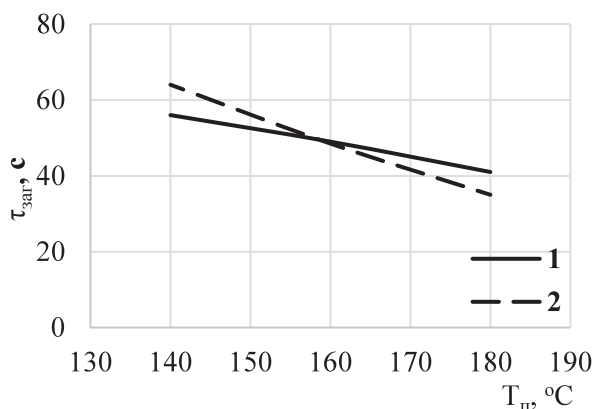
Рис. 4. Кінетичні залежності відносної тривалості а) зневоднення до крапки кр.3 і б) стадії досушування крапель розчинів КСБ з  $C_o$ : 1 – 5%; 2 – 10% від температури  $T_n$ .

речовин усі частки сироваткових білків були сухими, в потоці теплоносія і після охолодження термопластичних властивостей не проявляли. Через низький вміст сухих речовин частки мали тонкостінну структуру. Висушені з 10% розчину мали більш міцну і менш крихку структуру, ніж з 5%-го розчину, що вказує на доцільність збільшення вмісту сухих речовин у вихідному розчині для більшої міцності і монолітності висушених часток і, тим самим, для покращення структурно-механічних властивостей порошку і своєчасного видалення його з зони термічної дії в сушарці

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі. Дослідження показали, що із збільшенням вмісту сухих речовин від 5% до 10% у розчині білків сироватки тривалість випарювального періоду скоротчується у 2,5 – 3 рази, а темп нагрівання знижується у стадіях: кіркутворення - у 3 рази і досушування - на 16% і 27% при  $T_n=160$  і  $180^\circ\text{C}$  відповідно, що сприяє створенню щадних умов для сушіння фруктово- і ягідно-білкових композицій і, тим самим, збереженню їх термолабільних біоактивних складових.

Експериментально встановлено, що за показників  $\tau_{кр3}/\tau_{зар} \geq 0,8$  і  $\tau_{\sqrt{\tau_{зар}}} \approx 0,2$  розчини сироваткових білків належать до рідинних систем, здатних висушуватись до стану сипкого порошку низької кінцевої вологості.

Встановлено, що підвищення температури від  $140^\circ\text{C}$  до  $180^\circ\text{C}$  і вмісту сухих речовин від 5% до 10% сприяє на 15% більшому скороченню загального часу сушіння крапель розчинів сироваткових білків за умов ущільнення та зміцнення структури висушених часток.



**Рис. 5. Кінетичні залежності загального часу зневоднення крапель розчинів КСБ  $C_o$ : 1 – 5%; 2 – 10% від температури теплоносія  $T_n$**

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Chad M. Kerksick*, Chapter 38 - Requirements of Proteins, Carbohydrates, and Fats for Athletes, Editor(s): Debasis Bagchi, Sreejayan Nair, Chandan K. Sen, Nutrition and Enhanced Sports Performance (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 443-459, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00038-2>.

2. *M. Flambeau, C. Le Bourgot, A. Van der Mijnsbrugge, F. Respondek, A. Redl*, Chapter 4 - Proteins from Wheat: Sustainable Production and New Developments in Nutrition-Based and Functional Applications, Editor(s): Sudarshan Nadathur, Janitha P.D. Wanasundara, Laurie Scanlin, Sustainable Protein Sources (Second Edition), Academic Press, 2024, Pages 77-91, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91652-3.00024-1>.

3. *Sandeep Tiwari, Arun K. Jaiswal, Lucas G.R. Gomes, Syed B. Jamal, Munazza Kanwal, Edson L. Folador, Debmalya Barh, Vasco Azevedo*, Protein-Protein Interaction Networks: Theory, and Applications, Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2024, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00113-5>.

4. *David A. Korasick, Joseph M. Jez*, Protein Domains: Structure, Function, and Methods, Editor(s): Ralph A. Bradshaw, Gerald W. Hart, Philip D. Stahl, Encyclopedia of Cell Biology (Second Edition), Academic Press, 2023, Pages 106-114, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821618-7.00061-4>.

5. *Md. Amdadul Haque, Yakindra Prasad Timilsena, Benu Adhikari*, Food Proteins, Structure, and Function, Reference Module in Food Science, Elsevier, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03057-2>.

6. *Asfaw T. Mestawet, Thomas C. France, Patrick G.J. Mulcahy, James A. O'Mahony*, Component partitioning during microfiltration and diafiltration of whey protein concentrate in the production of whey protein isolate, International Dairy Journal, Volume 157, 2024, 106006, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106006>.

7. *Shayanti Minj, Sanjeev Anand* Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics Journal of Dairy Science Volume 105, Issue 3, March 2022, pp. 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>

8. *Gong Z., Yu M., Wang X., Shi X.* Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, Issue 1. P. 2229-2238. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2018.1506477>

9. Tontul I., Topuz A. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol.63. P.91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>

10. Сироватковий протеїн КСБ 65 ВІОs 1 кг [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://powerway.com.ua/product/sirovatkoviyu-protein-ksb-65-bios-1-kg/> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024 р.

11. Протеїн ВІОs Техмолпром КСБ-УФ 65, 1 кг [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://5lb.ua/ua/protein/bios-tehmolprom-ksb-uf-65-1kg.html> Назва з екрану. Дата звернення: 21 серпня 2024 р.

12. Протеїн КСБ 65 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://profirot.com.ua/ua/p52504985-protein-ksb-ukraina.html> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024р.

13. Концентрат сироваткового білка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://malik-group.com.ua/ua/p1264470636-kontsentrat-syvorotochnogo-belka.html> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024 р.

14. КСБ-УФ 80% концентрат сивороткового білка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lactose.com.ua/ua/p684212832-ksb-syvorotochnuj-proteinovuj.html> Назва з екрану. Дата звернення: 26 серпня 2024 р.

15. Долинский, А. А., Малецкая, К. Д. (2011). Распылительная сушка. В 2-х т. Т. 1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. Киев: Академперіодика. 376с.

## DRYING KINETICS OF WHEY PROTEIN SOLUTIONS AS A STRUCTURING COMPONENT FOR FRUIT AND BERRY-PROTEIN COMPOSITIONS

Turchyna T. Ya.<sup>1</sup>, Avdieieva L. Yu.<sup>2</sup>, Makarenko A.A.<sup>3</sup>, Dekusha H.V.<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

<sup>2</sup>Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

<sup>3</sup>PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

<sup>4</sup>PhD (Engin.), <http://orcid.org/0000-0002-8829-8221>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.5>

**Abstract.** The article is dedicated to the experimental study of drying kinetics in the "drop–vapor-gas environment" system for whey protein solutions as a structure-forming component capable of enhancing the efficiency of drying composite products based on fruit and berry raw materials using spray drying.

**The aim of the work** was to study the dehydration kinetics of individual droplets of whey protein solutions in the "drop–vapor-gas environment" system within a flow of heated heat carrier.

**Materials and Methods.** The study used solutions containing 5% and 10% dry matter, prepared by dissolving whey protein powder concentrate after ultrafiltration (WPC-UF) in water, according to "DSTU 4458:2005. Protein Milk Concentrates. Technical Specifications." The research was conducted on an experimental setup designed to study the drying process of single droplets, approximately 1.5 mm in size, of liquid systems in a flow of heated heat carrier.

**Results:** The research showed that for droplets of whey protein solutions with a higher content of dry matter (10%), increasing the temperature of the heat carrier from 140°C to 180°C results in a 15% reduction in overall drying time compared to a 5% solution, under conditions of densification and strengthening of the structure of the dried particles.

It was experimentally established that the main factor influencing the drying efficiency of whey protein solution

droplets (or fruit compositions with it) is the content of dry matter (proteins). For a solution with a higher dry matter content (10%), regardless of the drying temperature, there is a significant reduction in the heating rate of the droplets (in the crust formation stage - 3 times compared to a 5% solution) and correspondingly high values of relative drying time to the point  $\text{kr. } 3 (\geq 0.8)$ , which proves the ability of whey proteins to dry to a free-flowing powder state with low final moisture content.

Ref. 15, figures 5.

**Keywords:** drop, solution, whey proteins, temperature of the heat carrier, drying kinetics.

1. Chad M. Kerksick, Chapter 38 - Requirements of Proteins, Carbohydrates, and Fats for Athletes, Editor(s): Debasis Bagchi, Sreejayan Nair, Chandan K. Sen, Nutrition and Enhanced Sports Performance (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 443-459, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00038-2>.

2. M. Flambeau, C. Le Bourgot, A. Van der Mijnsbrugge, F. Respondek, A. Redl, Chapter 4 - Proteins from Wheat: Sustainable Production and New Developments in Nutrition-Based and Functional Applications, Editor(s): Sudarshan Nadathur, Janitha P.D. Wanasundara, Laurie Scanlin, Sustainable Protein Sources (Second Edition), Academic Press, 2024, Pages 77-91, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91652-3.00024-1>.

3. Sandeep Tiwari, Arun K. Jaiswal, Lucas G.R. Gomes, Syed B. Jamal, Munazza Kanwal, Edson L. Folador, Debmalya Barh, Vasco Azevedo, Protein-Protein Interaction Networks: Theory, and Applications, Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2024, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00113-5>.

4. David A. Korasick, Joseph M. Jez, Protein Domains: Structure, Function, and Methods, Editor(s): Ralph A. Bradshaw, Gerald W. Hart, Philip D. Stahl, Encyclopedia of Cell Biology (Second Edition), Academic Press, 2023, Pages 106-114, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821618-7.00061-4>.

5. Md. Amdatul Haque, Yakindra Prasad Timilsena, Benu Adhikari, Food Proteins, Structure, and Function, Reference Module in Food Science, Elsevier, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03057-2>.

6. Asfaw T. Mestawet, Thomas C. France, Patrick G.J. Mulcahy, James A. O'Mahony, Component partitioning during microfiltration and diafiltration of whey protein concentrate in the production of whey protein isolate, International Dairy Journal, Volume 157, 2024, 106006, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106006>.

7. *Shayanti Minj*, Sanjeev Anand Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics Journal of Dairy Science Volume 105, Issue 3, March 2022, pp. 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>
8. *Gong Z., Yu M., Wang X., Shi X.* Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, Issue 1. P. 2229-2238. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2018.1506477>
9. *Tontul I., Topuz A.* Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol.63. P.91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
10. *Syrovatkovi protein KSB 65 BIOs 1 kg* [Whey Protein KSB 65 BIOs 1 kg] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://powerway.com.ua/product/sirovatkovi-protein-ksb-65-bios-1-kg/> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
11. *Protein BIOs Tekhmolprom KSB-UF 65, 1 kg* [Protein BIOs Tekhmolprom KSB-UF 65, 1 kg] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://5lb.ua/ua/protein/bios-tehmolprom-ksb-uf-65-1kg.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 21 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
12. *Protein KSB 65* [Protein KSB 65] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://profiprot.com.ua/ua/p52504985-protein-ksb-ukraina.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
13. *Kontsentrat syrovatkovoho bilka* [Whey Protein Concentrate] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://malik-group.com.ua/ua/p1264470636-kontsentrat-syvorotochnogo-belka.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
14. *KSB-UF 80%* kontsentrat syvorotkovoho bilka [WPC-UF 80% Whey Protein Concentrate] [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://lactose.com.ua/ua/p684212832-ksb-syvorotochnyj-proteinovyj.html> Nazva z ekrany. Data zvernennia: 26 serpnia 2024 r. (in Ukr.)
15. *Dolinskyi, A. A., Maletskaiia, K. D.* (2011). Raspylitelnaia sushka. V 2-kh t. T. 1. Teplofizicheskie osnovy. Metody intensyfikatsii i enerhosberezheniia [Spray Drying. In 2 Volumes. Vol. 1. Thermophysical Fundamentals. Methods of Intensification and Energy Saving]. Kyiv: Akademperiodyka. 376 s. (in Rus.)

Отримано 29.08.2024

Received 29.08.2024

Прийнято до друку 14.11.2024  
Accepted for publication 14.11.2024