

ІНТЕНСИВНІСТЬ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ СУШІННІ КОЛОЇДНИХ РОЗЧИНІВ ТА РІДКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

Турчина Т.Я., канд. техн. наук, стар. наук. співр., Малецька К.Д. д-р техн. наук, стар. наук. співр., Авдєєва Л.Ю., д-р. техн. наук, стар. наук. співр., Макаренко А.А., канд. техн. наук
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ.

Анотація. Стаття присвячена аналітичним дослідженням інтенсивності масопереносу при зневодненні одиничних крапель різних за фізико-хімічним складом продуктів, одержаних у рідкій формі з зернової та плодово-овочевої сировини. Колоїдні розчини в дослідженнях представлені розчинами ячмінно-солодового екстракту з вмістом сухих речовин 25 % і 35 %, а колоїдні гетерогенні системи – томатним пюре з вмістом сухих речовин 18 % і томатною пастою – 27 %.

Мета роботи полягала у визначенні впливу двох факторів: температурних режимів сушіння та концентрації сухих речовин на інтенсивність масопереносу при зневодненні колоїдних розчинів та колоїдних гетерогенних систем за експериментальними даними кінетики сушіння одиничних крапель в системі «крапля – парогазове середовище».

Аналітичні дослідження показали, що при сушінні гетерогенних систем більший вплив на інтенсивність масопереносу чинить концентраційний фактор. Показано, як збільшення вмісту сухих речовин до 27% призводить до зменшення інтенсивності масопереносу при сушінні, що викликано значним зниженням дифузійної спроможності гетерогенної системи у більш концентрованій формі.

Встановлено, що температурний фактор чинить більший вплив на інтенсивність масопереносу в колоїдних розчинах, ніж в гетерогенних системах: при $T_n=180^\circ\text{C}$ інтенсивність процесу на 20 % вища.

Порівняльним аналізом тепломасообмінних характеристик сушіння різних за фізико-хімічним складом рідких продуктів близького вмісту сухих речовин визначено, що для більшої ефективності сушіння колоїдних гетерогенних систем з плодово сировини температурні режими мають бути децю вищі за температурні режими сушіння колоїдних розчинів ЯСЕ. Показано, що інтенсифікації тепломасопереносу при сушінні гетерогенних систем можна досягти зменшенням вмісту сухих речовин, наприклад, до 18 %, як в пюре.

Ключові слова: кінетика сушіння, температура теплоносія, інтенсивність масопереносу, колоїдні розчини, гетерогенні системи.

Постановка проблеми. Виходячи з необхідності одержання цілого ряду нового асортименту харчових продуктів з високою біоактивністю в порошковій формі, більшість з яких представляють собою колоїдні або колоїдні гетерогенні системи, для яких характерною ознакою є низька дифузійна спроможність та інші фізико-хімічні властивості (термопластичність, гігроскопічність), важливим стає питання оптимізації процесів розпилювального сушіння та рентабельності їх виробництва.

У зв'язку з цим необхідна більш детальна інформація щодо кінетики процесів тепломасообміну окремої краплинки (частинки) з високотемпературним теплоносієм та оцінки рівня внутрішнього тепломасопереносу, який протікає з одночасним процесом структуроутворення сухої частинки [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Все більш актуальним стає одержання продуктів оздоровчого та функціонального призначення з натуральної природної сировини у порошковій формі, що вимагає наукового обґрунтування теплотехнологічних режимів розпилювального сушіння для запобігання відкладень в камерах сушильних установок та подовження терміну їх безперервної експлуатації [1-6].

В основі концепції виробництва продуктів оздоровчого і функціонального призначення, розробленої науковою спільнотою провідних країн світу у зв'язку з небезпечним для здоров'я людей забрудненням навколишньої екосистеми, закладено використання виключно натуральної сировини без будь-яких хімічних або синтетичних добавок [6]. Одержані в процесі переробки зернової або плодової сировини рідинні продукти – це колоїдні розчини (екстракти, соки, соєве молоко) або колоїдні гетерогенні (мікрогетерогенні) системи (суспензії, пюре, пасти), процес сушіння яких може ускладнюватись як за рахунок особливостей структурування в одержаній рідкій формі, так і за рахунок таких фізико-хімічних факторів, як кислотність, дисперсність нерозчинних компонентів, в'язкість та термопластичність порошку [1, 6, 8, 9].

Ячмінно-солодовий екстракт, як і плодове пюре або паста, є біополімерами з вище зазначеними властивостями, зокрема, малою дифузійною спроможністю у більш концентрованій формі, через що вони належать до складних об'єктів розпилювального сушіння, схильних до відкладень в камері розпилювальної сушарки [6, 8]. Проте використання їх у складі продуктів оздоровчого і функціонального призначення обумовлене багатим вмістом корисних для здоров'я людини речовин. Так, враховуючи унікальність ячмінно-солодового екстракту, в якому поряд з багатим амінокислотним, білковим, вітамінним і мінеральним складом понад 80% загальної маси сухих речовин складають полісахариди, в т.ч. мальтоза, глюкоза, фруктоза, декстрини та

ін.[5, 8], виробництво його у порошковій формі як самостійного продукту або у поєднанні з білками тваринного або рослинного походження доволі актуальне.

Необхідність у проведенні даних аналітичних досліджень викликана тим, що колоїдні і колоїдні гетерогенні системи на рослинній основі при розпилювальному сушінні зазвичай проявляють схильність до відкладень, обумовлену наявністю речовин низької температури плавлення [5, 6, 8]. Проте, якщо одержання сипкої форми порошків ячмінно- та полісолодових екстрактів в розпилювальних сушарках досягалось охолодженням порошку [6, 8], то одержання порошків з плодової сировини без приведення її до певного ступеня дисперсності і без застосування спеціальних структуруючих і мікрокапсулюючих добавок практично неможливо[6, 8].

Визначення відмінностей при розпилювальному сушінні цих двох видів рідинних продуктів вимагає більш глибокого вивчення механізмів тепломасопереносу при їх зневодненні для інтенсифікації процесу і підвищення якості порошкового продукту.

Мета роботи полягала в проведенні аналітичних досліджень впливу температурних режимів сушіння та вмісту сухих речовин на інтенсивність масопереносу при зневодненні крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних матеріалів: колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту та гетерогенних систем з плодово-овочевої сировини на основі експериментальних даних.

Викладення основних результатів досліджень. Аналітичні дослідження проводились за експериментальними даними з кінетики сушіння крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних матеріалів, одержаними в системі «крапля-парагазове середовище» на експериментальному стенді зневоднення у статичних умовах [5, 8]: гетерогенних систем з плодово-овочевої сировини: №1 – томатне пюре з $C_0=18,0\%$, №2 – томатної пасти з $C_0=27,0\%$ (далі по тексту ТП-18 і ТП-27); колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту, отриманих з концентрату ЯСЕ розведенням водою до C_0 : №3 – 25 %, №4 – 35 % (далі по тексту ЯСЕ-25 і ЯСЕ-35).

В процесі розпилювального зневоднення на мікрокраплинки рідинного матеріалу мають вплив як зовнішні, так внутрішні чинники [1, 5]. Серед зовнішніх чинників ключову роль відіграють *температурні режими сушіння*, а серед внутрішніх – одним з основних вважається *концентраційний фактор*, лімітований в'язкістю рідкого матеріалу. Основною рушійною силою переносу вологи в матеріалі, як відомо [1, 5], є концентраційний градієнт.

У зв'язку з цим, взявши за основу експериментальні дані [6, 8], саме за цими двома чинниками впливу проведемо порівняльний аналіз тепломасообмінних характеристик сушіння крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних матеріалів, наведених у таблиці: колоїдних гетерогенних систем з плодової сировини: №1 - ТП-18 (томатне пюре) і №2 - ТП-27(томатна паста); колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту: №3 – ЯСЕ-25 і №4 - ЯСЕ-35. Процес сушіння крапель цих двох видів рідинних продуктів проводився при температурі теплоносія 160 °С та 180 °С. Для кращої візуалізації характеру протікання процесу термо- і масограми сушіння крапель ЯСЕ наведені на рис. 1.

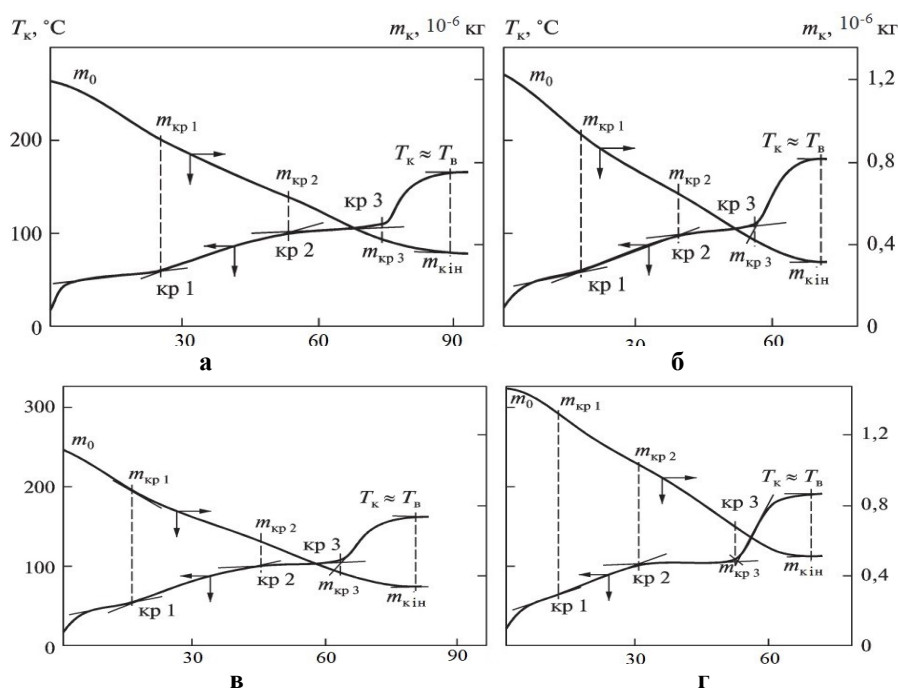


Рис. 1 – Термо- і масограми сушіння одиничних крапель колоїдних розчинів ячмінно-солодового екстракту з вмістом сухих речовин: а, б) $C_0=25\%$; в, г) $C_0=35\%$ при температурі теплоносія: а, в) $T_n=160^\circ\text{C}$; б, г) $T_n=180^\circ\text{C}$

Як видно з термо- і масограм (рис. 1), процес зневоднення крапель колоїдних розчинів ЯСЕ, як і крапель колоїдних гетерогенних систем – томатного пюре (ТП-18) і пасти (ТП-27), протікав у два періоди:

- випарювальному, де волога видалялась з вільної поверхні при температурі «вологого» термометру,
- і сушильному за умов збільшення температури краплі, викликаного формуванням поверхневої оболонки (кірочки) з виділених на її поверхні зародків сухої фази.

Характер термограм сушіння крапель томатних пюре і пасти відрізнявся від термограм сушіння крапель колоїдних розчинів ЯСЕ значно більшою тривалістю випарювального періоду, яка складала $\tau_{кр1}/\tau_{зар}\geq 0,5$, що характерно для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Для колоїдних розчинів ЯСЕ тривалість випарювального періоду, як видно з термограм (рис. 1) складає $\tau_{кр1}/\tau_{зар}\leq 0,25-0,30$.

Як видно на термограмах (рис. 1) зі збільшенням вмісту сухих речовин і з підвищенням температури теплоносія від 160 °С до 180 °С крапка кр.1, яка поділяє випарювальний і сушильний періоди, зміщується до початку процесу з відповідним зменшенням крапки $m_{кр1}$ на масограмах, що свідчить про збільшення вологовмісту u_{rh1} в крапках на момент початку сушильного періоду. За таких умов відбувається подовження сушильного періоду за рахунок збільшення його складових: стадій кіркоутворення (відрізок термограми між критичними крапками кр.1 та кр.2) та кипіння (відрізок термограми між критичними крапками кр.2 та кр.3), викликаного опором дифузійному процесу масопереносу (вологпереносу) з боку утвореної на поверхні крапель оболонки (кірочки) сухої фази. При цьому паропровідними властивостями поверхневої оболонки (кірочки) визначається інтенсивність процесу вологпереносу при зневодненні.

Випарювальний період. Кінетичні залежності інтенсивності масопереносу у випарювальному періоді $(dm_k/dt)_{вип}=f(T_n)$ обох видів рідинних матеріалів, одержані за експериментальними даними [5, 8], наведені на рис 2. Як видно з наведених залежностей (рис. 2) вплив концентраційного та температурного факторів на інтенсивність масопереносу у випарювальному періоді проявляється для цих двох видів матеріалів по-різному. Якщо в гетерогенних системах з підвищенням показників C_0 (рис. 2, а) від 18 % (крива 1) до 27 % (крива 2), інтенсивність масопереносу незалежно від температури теплоносія була дещо нижчою (на 8%), то з підвищенням температури від 160 °С до 180 °С для обох продуктів - збільшилась на 15 %.

При зневодненні колоїдних розчинів (рис. 2, б) показники C_0 взагалі не впливали на інтенсивність масопереносу у цьому періоді: залежності 3 і 4 розташовані на графіку впритул один до одного. Проте з підвищенням температури від 160 °С до 180 °С інтенсивність масопереносу незалежно від C_0 збільшилась на 20 %.

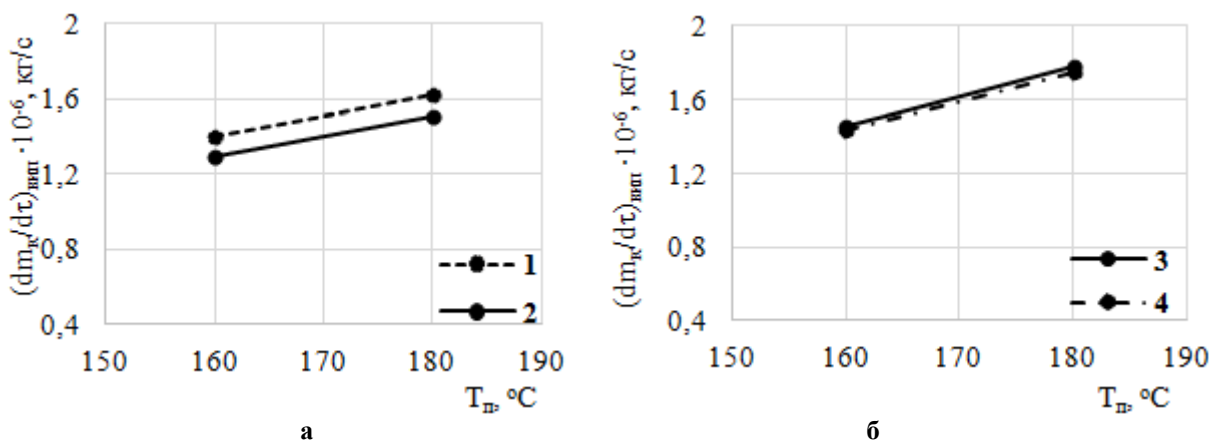


Рис. 2 – Кінетичні залежності інтенсивності масопереносу у випарювальному періоді сушіння крапель: а) гетерогенних систем: 1–ТП-18; 2–ТП-27; б) колоїдних розчинів: 3–ЯСЕ-25; 4–ЯСЕ-35

Порівняння тепломасообмінних характеристик продуктів близького вмісту сухих речовин, але різної природи, а саме: №2 – ТП-27 і №3 - ЯСЕ-25 (рис.2) показало, що при $T_n=160 \text{ }^\circ\text{C}$ показники $(dm_k/dt)_{вип}$ для ЯСЕ більше співпадають з показниками ТП-18 (крива 1) і дещо вищі за ТП-27 (на 12 % , крива 2). А з підвищенням (до 180 °С) теплового впливу дифузійні властивості колоїдного розчину ЯСЕ-25 (крива 3, рис. 2, б) покращились настільки, що інтенсивність масопереносу досягла значень $1,78 \cdot 10^{-8} \text{ kg/s}$, що на 16 % вище за інтенсивність масопереносу в гетерогенній системі ТП-27 (крива 2, рис. 2, а).

Такий результат можна пояснити меншими значеннями температурного коефіцієнту сушіння $b=dT_k/du$ для гетерогенних систем (табл.), що узгоджується з даними [3, 4, 7] за фактом, що при наявності мікрочастинок клітковини, волокон, оболонок і інших включень (або додаткових поверхонь розділу фаз) знижується теплова дія на термолабільний матеріал при сушці. Як показали розрахунки, при $T_n=160 \text{ }^\circ\text{C}$ температурний коефіцієнт сушіння для ТП-27 нижчий за температурний коефіцієнт сушіння ЯСЕ-25 (табл.).

Сушильний період. Динаміку зниження інтенсивності масопереносу в стадіях кіркоутворення та кипіння (складових сушильного періоду) відносно випарювального періоду під впливом температурного та кон-

центраційного факторів одразу встановлюємо при зіставленні тепломасообмінних характеристик $(dm_k/dt)_{кр1-кр3}/(dm_k/dt)_{кр1}$ (табл.). Згідно цих даних показники C_o мали більший вплив на відносні значення $(dm_k/dt)_{кр1-кр3}/(dm_k/dt)_{кр1}$ при сушінні саме гетерогенних систем, при цьому для усіх досліджених продуктів незалежно від температури ці величини характеризувались постійністю $(dm_k/dt)_{кр1-кр3}/(dm_k/dt)_{кр1} = \text{const}$.

За даними таблиці, якщо найбільше зниження інтенсивності масопереносу у сушильному періоді відносно випарувального періоду серед колоїдних розчинів визначено для ЯСЕ-25 (на 29%, №3), то серед гетерогенних систем – для ТП-27 (на 35%, №2), що свідчить про більший вплив концентраційного фактору на дифузійну спроможність даного матеріалу за щадних умов підведення тепла при сушінні завдяки наявності мікро- та наночастинок у складі гетерогенної системи більшого вмісту сухих речовин.

Таблиця 1

Тепломасообмінні характеристики зневоднення крапель гетерогенних систем з плодової сировини та колоїдних розчинів ЯСЕ

T _п , °C	Гетерогенні системи		Колоїдні розчини	
	№1	№2	№3	№4
	ТП-18	ТП-27	ЯСЕ-25	ЯСЕ-35
$(dm_k/dt)_{кр1-кр3}/(dm_k/dt)_{кр1}$				
160	0,75	0,65	0,71	0,76
180				
$b = dT_k/du, °C/кг/кг$				
160	47,2	55,6	63	63
180	-	-	72	72

$(dm_k/dt)_{кр1-кр3}$ має температурний фактор: з підвищенням температури від 160°C до 180°C інтенсивність масопереносу у цьому періоді, як і у випарувальному, зростає в середньому на 20%, що обумовлено більшими значеннями температурного коефіцієнту сушіння b ЯСЕ-25 і ЯСЕ-35 (табл.).

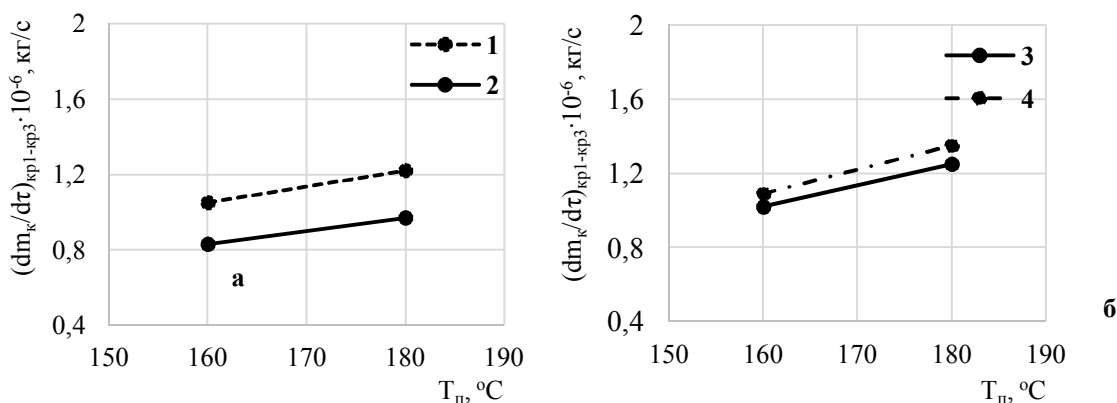


Рис. 3 – Кінетичні залежності інтенсивності масопереносу у стадіях кіркоутворення та кипіння присушніні крапель: а) гетерогенних систем: 1 – соку; 2 – торе; 3 – пасти; б) колоїдних розчинів: 4 – ЯСЕ-25; 5 – ЯСЕ-35, 6 – ЯСЕ-45.

Порівняльний аналіз значень $(dm_k/dt)_{кр1-кр3}$ для продуктів різного фізико-хімічного складу і близьких показників C_o : ТМ-27 (крива 2, рис. 3, а) і ЯСЕ-25 (крива 3, рис. 3, б) показав, що завдяки більшій дифузійній спроможності інтенсивність масопереносу в сушильному періоді для крапель ЯСЕ-25 зростає ще більше у порівнянні з випарувальним періодом і в середньому на 20% перевищила інтенсивність масопереносу в краплях гетерогенної системи (ТМ-27), що обумовлено, як зазначалось вище, більшим температурним коефіцієнтом сушіння при $T_p=160$ °C і, тим більш при $T_p=180$ °C (табл.).

Виходячи з кінетичних кривих $(dm_k/dt)_{вип} = f(T_p)$ (рис. 2) та $(dm_k/dt)_{кр1-кр3} = f(T_p)$ (рис. 3), для зневоднення крапель у випарувальному періоді з інтенсивністю масопереносу $(dm_k/dt)_{вип} \approx 1,45-1,5 \cdot 10^{-8}$ кг/с та в сушильному періоді з інтенсивністю $(dm_k/dt)_{кр1-кр3} \approx 1 \cdot 10^{-8}$ кг/с для колоїдного розчину ЯСЕ-25 достатньою буде $T_p=160$ °C (крива 3, рис. 3, б). Для гетерогенної системи ТМ-27 теплоносій необхідно буде нагріти вже до $T_p=180$ °C або знизити вміст сухих речовин у рідинній системі, що подається на сушку, до $C_o=18-20$ %, як в ТП-18 (крива 1, рис. 2, а; рис. 3, а), інтенсивність процесу якого значно вище за ТП-27. Тобто сушити методом розпилювання енергетично доцільніше гетерогенну систему ТП-18 завдяки більшій її дифузійній спроможності при меншому вмісті сухих речовин, що обумовило більшу інтенсивність масопереносу при її зневодненні, тим більш при меншому у порівнянні з рештою досліджених продуктів температурному коефіцієнту сушіння b (табл. 1).

Таким чином, проведені аналітичні дослідження показали, що при організації виробництва порошкової форми солодових екстрактів або плодової сировинних матеріалів слід враховувати той факт, що для забезпечення високої якості висушеного продукту температурні параметри сушіння для плодових гетерогенних систем мають бути дещо вищі за температурні параметри сушіння колоїдних розчинів ЯСЕ.

Висновки. Проведений аналіз тепломасообмінних характеристик при зневодненні крапель різних за фізико-хімічним складом рідинних систем показав, що при зневодненні крапель гетерогенних систем більший вплив на інтенсивність масопереносу чинить концентраційний фактор. Встановлено, що зменшення інтенсивності масопереносу при сушінні гетерогенних систем більшого вмісту сухих речовин (ТП-25) викликане значним зниженням їх дифузійної спроможності.

Встановлено, що інтенсивність масопереносу в колоїдних розчинах ЯСЕ перебуває під більшим впливом температурного фактору, ніж в гетерогенних системах: при $T_n=180^\circ\text{C}$ інтенсивність зростає на 20%.

За результатами порівняльного аналізу різних за фізико-хімічним складом рідинних систем близького вмісту сухих речовин встановлено, що для забезпечення високої якості висушеного продукту температурні параметри сушіння для плодових гетерогенних систем мають бути дещо вищі за температурні параметри сушіння колоїдних розчинів ЯСЕ. Встановлено, що інтенсифікації процесів тепломасопереносу при зневодненні плодових гетерогенних систем можна досягти зменшенням концентрації до $20\pm 3\%$.

References

1. Dolinsky, A.A., & Ivanitskiy, G.K. (1984). Optimizatsiya protsessov raspylitel'noy sushki. Kyiv: Naukova dumka.
2. Masters, R. (2003). Reflections on spray drying achievements and challenges. In Proc. of 2nd Nordic Drying Conf. (pp. 8-17). Copenhagen, Denmark.
3. Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. Trends in Food Science & Technology, 63, 91-102.
4. 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. DOI: 10.1080/10408398.2012.672939
5. Chegini, G.R., & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. Retrieved January 2007, from <https://www.researchgate.net/publication/242193527>
6. Dolinsky, A.A., & Maletskaya, K.D. (2015). Raspylitel'naya sushka: v 2 t. T. 2: Teplotekhnologii i oborudovanie dlya polucheniya poroshkovykh materialov. Kyiv: Akadempriodika.
7. Korhonen, H. (2002). Technology options for new nutritional concepts. International Journal of Dairy Technology, 55(2), 79-90.
8. Turchina, T.Ya. (2011). Intensifikatsiya teplovologoperekhodu pri rozpylyvalnomu sushinni termoplastychnykh materialiv z roslynnoyi syrovyny: dys...kand.tekhn.nauk: 05.14.06. Kyiv.
9. Yemelyanova, N.O., Grechko, N.Ya., Koshova, V.M., & Sukhodol, V.Kh. (1994). Tekhnolohiya solodovykh ekstraktiv, kontsentrativ kvasnoho susla i kvasu. In N.O. Yemelyanovoyi (Ed.), Kyiv: ISDO.
10. Cheng, X.D. (2004). Heat-Mass Transfer and structure formation during drying of single food droplets. Drying Technology, 22(1-2), 179-190.

MASS TRANSFER INTENSITY DURING THE DRYING PROCESS OF COLLOIDAL SOLUTIONS AND LIQUID HETEROGENEOUS SYSTEMS

Turchyna T.Y., Candidate of Sciences, senior researcher, Maletskaya K.D. Doctor of Sciences, senior researcher, Avdieieva L. Yu, Doctor of Sciences, senior researcher, Makarenko A.A., PhD Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv

Abstract. The article is dedicated to the analytical investigations of mass transfer intensity during the dehydration of individual droplets with different physicochemical composition of products obtained in liquid form from grain and fruit-vegetable raw materials. Colloidal solutions in the study are represented by barley-malt extract solutions with a dry matter content of 25% and 35%, while colloidal heterogeneous systems consist of tomato puree with a dry matter content of 18% and tomato paste with a dry matter content of 27%.

The objective of the study was to determine the influence of two factors, namely drying temperature regimes and dry matter concentration, on the mass transfer intensity during the dehydration of colloidal solutions and colloidal heterogeneous systems based on experimental data of drying kinetics of individual droplets in the "droplet-vapor/gas environment" system.

Analytical investigations revealed that in the drying of heterogeneous systems, the concentration factor has a greater impact on the mass transfer intensity. It was demonstrated that increasing the dry matter content up to 27%

leads to a decrease in the mass transfer intensity during drying, which is attributed to a significant reduction in the diffusion capacity of the more concentrated heterogeneous system.

It has been established that the temperature factor has a greater influence on the mass transfer intensity in colloidal solutions compared to heterogeneous systems. At a drying temperature of 180°C, the process intensity is 20% higher.

A comparative analysis of the heat and mass transfer characteristics of drying various liquid products with similar dry matter contents but different physicochemical compositions revealed that for more effective drying of colloidal heterogeneous systems based on fruit raw materials, the temperature regimes should be slightly higher than those used for drying colloidal solutions of similar composition. It has been shown that intensification of heat and mass transfer during the drying of heterogeneous systems can be achieved by reducing the dry matter content, for example, down to 18% as in the case of puree.

Key words: drying kinetics, coolant temperature, mass transfer intensity, colloidal solutions, heterogeneous systems.

Список використаної літератури

1. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Оптимизация процессов распылительной сушки. Киев : Наукова думка, 1984. 240с.
2. Masters R. Reflections on spray drying achievements and challenges//Proc. of 2nd Nordic Drying Conf., 2003. Copenhagen, Denmark. P. 8-17.
3. Ismail Tontul, Ayhan Topuz. 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.
4. Verma A, Singh SV. Spray drying of fruit and vegetable juices--a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2015;55(5):701-19. DOI: 10.1080/10408398.2012.672939
5. G.R. Chegini, Barat Ghobadian. Spray dryer parameters for fruit juice drying. January 2007. <https://www.researchgate.net/publication/242193527>
6. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка.: в 2 т. Т. 2: Теплотехнологии и оборудование для получения порошковых материалов. Киев: Академперіодика, 2015. 390 с.
7. Korhonen H. Technology options for new nutritional concepts / *International journal of Dairy Technology*, 2002. V. 55, № 2. P.79-90.
8. Турчина Т.Я. Інтенсифікація тепловологопереносу при розпилювальному сушінні термопластичних матеріалів з рослинної сировини: дис.... канд.техн.наук: 05.14.06. К., 2011. 245с.
9. Ємельянова Н.О., Гречко Н.Я., Кошова В.М., Суходол В.Х.. Технологія солодових екстрактів, концентратів квасного сула і квасу / За ред. Н.О. Ємельянової. – Київ : ІСДО, 1994. – 152 с.
10. Xiao Dong Cheng: Heat-Mass Transfer and structure formation during drying of single food droplets. *Drying Technology*. 2004. V.22, Is. 1-2. P. 179-190.

Отримано в редакцію 22.05.2023
Прийнято до друку 16.11.2023

Received 22.05.2023
Approved 16.11.2023