

УДК: 66.08 : 532.5: 664.1 : 664.8 : 66.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДІВЕ-ОБРОБКИ І БІОПОЛІМЕРНИХ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОДОВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ ЯК ОБ'ЄКТІВ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ

Турчина Т.Я.¹, канд. техн. наук, Авдєєва Л.Ю.², докт. техн. наук, Макаренко А.А.³, канд. техн. наук, Козак М.М.⁴

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

¹старший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²провідний науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

³старший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

⁴молодший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2589-4998>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.3>

В статті представлено результати досліджень впливу роторно-пульсаційних апаратів двох типів та фізико-хімічних і морфологічних особливостей плодово-овочевої сировини на процес диспергування для отримання водних суспензій із заданою дисперсністю і структурно-механічними властивостями. Наведені характеристики отриманих в результаті диспергування суспензій одержаних в результаті гідромеханічної обробки. За результатами експериментальних і аналітичних досліджень визначено тип роторно-пульсаційного апарату для проведення гідромеханічної обробки плодових мас та визначено раціональні умови введення структуруючих біополімерних добавок.

The article presents the results of research on the impact of two types of rotor-pulsation apparatus and the physicochemical and morphological characteristics of fruit and vegetable raw materials on the dispersion process for obtaining aqueous suspensions with a specified particle size distribution and structural-mechanical properties. The characteristics of the obtained suspensions resulting from hydro-mechanical processing are provided. Based on the results of experimental and analytical studies, the type of rotor-pulsation apparatus for conducting hydro-mechanical processing of fruit masses is determined, and the rational conditions for introducing structuring biopolymeric additives are identified.

Бібл. 13, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: плодова сировина, гідромеханічна обробка, біополімерна добавка, патока, гетерогенна система, дисперсність.

Постановка проблеми. У технологіях розпилювального сушіння підготовка плодової сировини до сушіння має визначальне значення, оскільки саме на цій стадії закладаються потенційні властивості рідинної гетерогенної системи і характеристики висушеного в подальшому порошку. Тому при виборі обладнання для одержання плодової гетерогенної системи із заданими характеристиками, зокрема, дисперсними, і достатньою для подачі в сушарку текучістю важливо враховувати особливості фізико-хімічного складу і будови плодів, що підлягають переробці [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ключовими факторами, що визначають ефективність розпилювального сушіння, є характеристики висушених порошоків. А вони цілком залежать від фізико-хімічних

характеристик сировинного матеріалу, у т.ч. його структуроутворюючого потенціалу, ступеня дисперсності частинок нерозчинних фракцій та реологічних властивостей. Реологія плодової гетерогенної системи має забезпечити формування сферичної форми крапель в момент відриву їх від кромки дискового розпилювача, а скорегований на стадії підготовки до сушіння структуроутворюючий потенціал висушеного матеріалу – міцну термостійку структуру її поверхневої кірочки з паропровідними властивостями, достатніми для миттєвого їх висушування [1, 3, 4].

Проблеми формо-, структуроутворення та зміцнення поверхневого шару часток при розпилювальному сушінні плодових гетерогенних систем, що містять біополімери із властивостями, характерними

для колоїдних розчинів, доцільніше корегувати саме на стадії їх підготовки до сушіння. При цьому слід враховувати відмінності будови різних видів плодів за формою клітин та щільністю їх пакування, міцність їх клітинних оболонок і здатність до руйнування, вміст клітинної вологи, білків, полісахаридів та ін. розчинних та нерозчинних речовин. Крім того, від умов гідромеханічної обробки плодів фізико-хімічний склад, стан рідкої фази щойно одержаної гетерогенної системи та її реологічні властивості можуть змінюватись в залежності від кількості вилученого соку та речовин, що перейшли у розчинний стан в результаті деструкції їх фізичних структур [2, 5-7] Зокрема:

- вуглеводи, що звільняються з клітинних та міжклітинних об'ємів в результаті деструкції структурних систем, переходять у розчинний стан на 3-34%;

- вітамін С може бути втрачений на 20-70%, однак, це значно менше за втрати при бланшуванні, протиранні та стерилізації;

- білки, інулін та ін. речовини частково переходять у розчинний стан;

- протопектин, що входить до складу клітин, розщеплюється і переходить у розчинний стан на 50-100%

Більш того, ступінь вилучення усіх цих речовин з плодів структур під час гідромеханічної обробки (деструкції) і переходу у розчинний стан обумовлюється певною природною кислотністю середовища [8]. З іншого боку підвищений вміст органічних кислот у плодів середовища є основним з чинників адгезійних явищ в розпилювальних сушарках, що вимагає застосування біополімерних добавок для корегування показників рН.

Відомо, що в робочих органах сучасних роторно-пульсаційних апаратів реалізується метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) - ефективний інструмент інтенсифікації процесів змішування, диспергування, екстракції і гомогенізації дисперсних середовищ з плодової сировини, який використовується у різних технологіях, у т.ч. розпилювального сушіння [9]. Тому вибір такого апарату для підготовки плодової сировини до сушіння вимагає розуміння впливу методу ДІВЕ на її структурні системи.

Механізми ДІВЕ умовно поділяють на жорсткі і м'які без визначення чіткої межі між ними, зокрема перші ефективні при руйнуванні і подрібненні плодів структур до утворення частинок мікро- та нанорозмірів. Вважається, що на подрібнення дуже малих дисперсних часток витрачається незрівнянно більше енергії, ніж на руйнування великих часток [9, 10].

В залежності від складу гетерогенної системи той чи інший механізм ДІВЕ, що діє в роторно-пульсаційному апараті, є домінуючим. Так, при обробці нев'язких мас переважають кавітаційний, пульсаційний, вихровий механізми, а високов'язких гетерогенних систем - зсувних напружень. Виходячи з фізико-хімічних особливостей плодової сировини, обирають один роторно-пульсаційний апарат певної конструкції або комплект з 2-х таких апаратів різних конструкцій [10].

Як показує досвід [6, 7, 11], деякі проблеми плодів гетерогенних систем лише ДІВЕ-обробкою без застосування біополімерних структуруючих добавок вирішити неможливо:

- низька текучість при вмісті сухих речовин 5-14%, характерна для неньютонівських рідких мас

- висока в'язкість, яка під час гідромеханічної обробки може різко зростати за рахунок переходу гелеутворюючих речовин зі структур плодів у розчинний стан, наприклад, пектинів;

- здатність дисперсних частинок до агломерації або їх груп до самоорганізації в асоціати розміром $\geq 350-600$ мкм призводить до відкладень на стінках сушильних камер через нерівномірність висушування крапель полідисперсного складу у факелі розпилю;

- наявність органічних кислот (9-17%) у високовуглеводному продукті ($\geq 70-80\%$), показники кислото середовища (рН=2,5-3,7) і їх нестабільність у часі визначає належність багатьох плодів гетерогенних систем до складних термопластичність та адгезійність матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння;

- термо- та ксероствраливість фрагментів клітковини, волокон, кісточок насіння та ін. біоактивних речовин плодової сировини при сушінні розпилюванням, свідченням чого є потемніння і висока гігроскопічність порошку, погіршення органолептичних та структурно-механічних характеристик, що вимагає застосування біополімерних структуруючих добавок.

Структуруючі добавки з натуральної природної сировини стали невід'ємними засобами корегування властивостей харчових середовищ, в т.ч. дитячих та дієтичних [5, 12]. До них належать білки тваринного (наприклад, молочні, сироваткові) та рослинного (наприклад, соєві) походження, похідні крохмалевмісних продуктів: мальтодекстрин, циклодекстрин, крохмальна патока.

Крохмальна патока є добре розчинним у воді колоїдним біополімером з рН $\geq 4,6$, який широко використовується у фармацевтичній, харчовій (у

т.ч. дитяче харчування) та ін. галузях[1, 13]. Завдяки її буферним властивостям гальмуються небажані ферментативні і окислювальні процеси у гетерогенних системах, стабілізуються показники кислотності. За рахунок таких добавок, як нормально оцукрена патока, яка містить 55-60% термостійких декстринів ($T_{пл} > 145^{\circ}C$), плодові гетерогенні системи набувають термостійкості при сушінні і консервуванні [2, 3, 6].

Враховуючи близькі до закордонних аналогів (мальтодекстрину) характеристики, доступність, багатофункціональність та дієтичні якості, саме крохмальну патоку було використано у нашій роботі як коригуючого засобу текучості плодових гетерогенних систем на стадії підготовки до розпилювального сушіння.

Мета роботи полягала у дослідженні впливу ДІВЕ-обробки різних видів плодової сировини в роторно-пульсаційних апаратах двох типів та введених біополімерних добавок на характеристики одержаних плодових гетерогенних систем як об'єктів розпилювального сушіння.

Матеріали та методи. В дослідженнях використовувалось:

- плоди малини і полуниці, що перероблялись разом з кісточками насіння, а також абрикосів (без кісточок) згідно ДСТУ ISO 22000:2019 (ISO 22000:2018, IDT) «Системи управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги до організацій харчового ланцюгу», що перероблялись у композиції з бланшованими плодами моркви, кількість якої у складі композицій складала $\leq 15\%$ від загальної маси сухих речовин, згідно ДСТУ 7035:2009 Морква свіжа. Технічні умови. (далі по тексту АМ-композиції)

- пюре свіжих томатів (далі по тексту томатне пюре) згідно ДСТУ 3246-95 Томати свіжі. Технічні умови.

В якості структуруючих добавок використовувались:

- крохмальна патока (далі по тексту патока) - в Україні виробляється у формі рідкого концентрату з вмістом сухих речовин 78% згідно з ДСТУ 4498:2005 Патока крохмальна. Технічні умови;

- концентрат сироваткового білку (далі по тексту КСБ) з вмістом білка $\geq 80\%$, одержаний методом ультрафільтрації підсирної сироватки згідно ДСТУ 4458:2005. Концентрати білкові молочні. Технічні умови.

Роторно-пульсаційні апарати (далі по тексту РПА) двох типів, на яких проводились дані дослідження у режимі рециркуляції плодових гетерогенних систем, відрізнялись, як показано в таблиці 1, за технічними і конструктивними характеристиками [10]. Дослідження проводились з фіксацією загального часу гідромеханічної обробки, температури гетерогенних систем до і після обробки та мікроструктурним аналізом їх дисперсного складу морфометричним методом за максимальним лінійним розміром частинок нерозчинних фракцій з використанням оптичної (мікроскоп МБІ-4У32) та цифрової техніки.

Масова частка сухих речовин плодових гетерогенних систем визначалась згідно з ДСТУ 7804:2015. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методика визначення сухих речовин або вологи.

Показники кислого середовища плодових гетерогенних систем визначались згідно ДСТУ ISO 1842:2013. Продукти плодоовочеві. Метод визначення рН (ISO 1842:1991, IDT)

Викладення основних результатів досліджень. ДІВЕ-обробкою ми називаємо гідромеханічну обробку плодових мас в умовах дії механізмів дискретно-імпульсного введення енергії, які реалізуються в РПА. Така ДІВЕ-обробка забезпечує приведення частинок нерозчинних фракцій фізичних структур плодів (клітковини, волокон, шкірок, кісточок насіння) до такого ступеня дисперсності, при якому досягається переважно в присутності декстринвмісної добавки достатній для подачі в розпилювальну сушарку дискового типу стан текучості плодової гетерогенної системи, який ми називаємо *нормалізованим*, а сам процес – *нормалізацією за дисперсним складом*.

Дослідження проводились на експериментальному стенді, наведеному на рис. 1, з фіксацією наступних

Таблиця 1. Технічні та конструктивні характеристики РПА, використаних у дослідженнях

Марка РПА	Тип апарату	Потужність, кВт	Продуктивність, кг/год	Міждисковий просвіт, мм	Міжциліндровий просвіт, мм	Кількість статорів/роторів, шт	Частота обертання ротора, об/хв.
АР-3000	дисково-циліндричний	3,0	500-3000	0,1	0,09	1/1	2880
БГ-3	циліндричний	5,5	400-500	-	0,5-0,8	2/1	3000

характеристик плодових мас до і після ДІВЕ-обробки і введення біополімерної структуруючої добавки: стану текучості, температури T_p , дисперсного складу гетерогенної системи (за δ_{max}) як критерія оцінки ефективності ДІВЕ-обробки, вмісту сухих речовин C_o та показників рН плодового середовища (табл. 1).

На відміну від ягід і томатного пюре (поставка від агрофірми-виробника) плоди абрикосів (без кісточок) разом з плодами бланшованої моркви перед завантаженням до приймальної ємності (3) піддавались попередньому подрібненню у шнековому пристрої (2). З включенням насоса(6) плодова маса і (через пару хвилин) разом із структуруючою біополімерною добавкою (або комплексом добавок) з приймальної ємності (3) спрямовувалась до РПА (5) в режимі рециркуляції до одержання однорідної гетерогенної системи заданого ступеня дисперсності, який для експериментальної розпилювальної сушарки з дисковим розпилювачем Ц-18 визначався за максимальним розміром мікрочастинок нерозчинних фракцій і складав $\delta_{max} \leq 100-15 \mu\text{м}$.

Одержані в результаті ДІВЕ-обробки плодови маси без добавок за фізичним станом представляли собою високовологі (табл. 1) щільні нетекучі маси з аномальними реологічними властивостями, характерними для «неньютонівських» рідин. Введення до їх складу патоки як структуруючої біополімерної добавки сприяло не тільки збільшенню вмісту сухих речовин (табл. 1), а й покращенню текучості.

Ягідні композиції з малини і полуниці відрізнялись від інших досліджених гетерогенних систем найменшим, як показано в таблиці 2, вмістом сухих речовин (5-10%) і найбільшим вмістом органічних кислот. За таких показників рН (табл. 2) ягідних рідинних систем, характерних для кислих середовищ, вірогідність адгезійних явищ при їх подальшому розпилювальному сушінні була достатньо високою, що вимагало введення біополімерних структуруючих добавок для їх нейтралізації.

Як показано в таблиці 3, загальна кількість введених до ягідних композицій під час ДІВЕ-обробки біополімерних добавок складала 65-75%. При цьому

Таблиця 2. Характеристики плодових гетерогенних систем, що пройшли ДІВЕ-обробку без/з структуруючими добавками

Плодова сировина	Ступінь фракціонування	Без добавок		З патокою	
		рН	C_o , %	рН	$C_{суп}$, %
Полуниця	Сік	2,7	5,0-7,0	4,2	16,0-18,0
Малина	пюре	3,0	7,0-10,0	4,1	18,0-27,0
Абрикоси з морквою	пюре	3,6	13,0-14,0	4,3	22,5-27,5
Томати	пюре	3,4	20,0	4,5	24,0-27,0

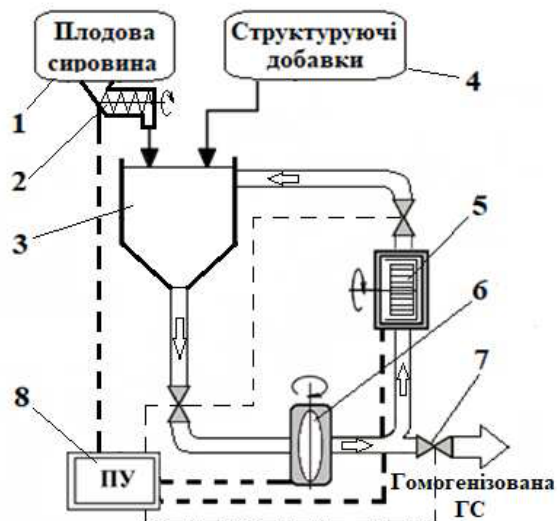


Рис. 1. Схема експериментального стенду ДІВЕ-обробки плодових мас в режимі рециркуляції:

1 – плодова сировина; 2 – шнекова подача плодової сировини; 3 – приймальна ємність; 4 – структуруючі добавки; 5 – РПА; 6 – насос; 7 – запірно-регулювальна апаратура; 8 – пульт управління

завдяки буферним властивостям патоки для підвищення і стабілізації показників рН на рівні $\geq 4,0$ (табл. 2) композицій та уникнення коагуляції білків сироватки у кислому середовищі соків та пюре, які подавалась до РПА, спочатку вводилась патока, а потім КСБ.

У досліді № 1 (табл. 3) введення до полуничного соку з $C_o = 5,0\%$ під час ДІВЕ-обробки 78%-го концентрату патоки (50% від загальної маси сухих речовин) і порошкового КСБ (25% від загальної маси С.Р.) сприяло збільшенню вмісту сухих речовин до $C_{\text{сусп}} = 16\%$ (табл. 2) та нейтралізації кислого середовища до значень $\text{pH} = 4,2$.

У дослідях № 2-5 (табл. 3) введення біополімерних добавок до ягідних пюре також сприяло покращенню фізико-хімічних характеристик ягідних гетерогенних систем як об'єктів розпилювального сушіння. Показники кислого середовища ($\text{pH} = 3,0-3,6$) нейтралізувались до значень $\text{pH} = 4,1-4,5$ (табл. 2), що важливо було досягти на стадії підготовки їх до розпилювального сушіння для уникнення в подальшому адгезійних явищ в камері сушильної установки.

Експериментально встановлено, що більш ефективним в одержанні ягідних гетерогенних систем із заданими дисперсними характеристиками, що відповідають умовам ефективного процесу розпилювального сушіння подібних рідинних систем ($\delta_{\text{max}} \leq 100-150 \mu\text{м}$) (крива 1, рис. 2, а), виявився апарат циліндричного типу БГ-3 (№2-4, табл. 2). Так, за кривими $\delta_{\text{max}} = f(\tau)$ (рис. 2, а) заданий ступінь дисперсності гетерогенної системи в апараті БГ-3 досягався вже на 3-й хв., а на 5-й знижувався до $\delta_{\text{max}} \leq 80 \mu\text{м}$ при її нагріванні до $T_{\text{сусп}} = 25^\circ\text{C}$ (крива 1, рис. 2, б).

В малиновій гетерогенній системі після обробки в апараті АР-3000 значення δ_{max} виявились у 4 рази більшими (крива 2, рис. 2, а) за ті ж значення після обробки в апараті БГ-3, що може бути пов'язано з конструктивними особливостями робочого органу апарату (набором статор/ротор) і меншою його потужністю (табл. 1). А через затримання в міждисккових просвітах і зазорах статора-ротора кісточок насіння малини її температура на 2-й і 5-й хв. зросла відповідно до 45°C і 55°C

Табл. 3. Кількість структуруючих добавок, введених до складу ягідних композицій в процесі їх ДІВЕ-обробки

№ досліду	Марка апарату	Вид сировини	СД - патока, %	КСБ, %
1.	БГ-3	Полуничний сік	50,0	25,0
2.		Полуничне пюре з кісточками насіння	60,0	-
3.		Полуничне пюре з кісточками насіння	42,0	29,0
4.		Малинове пюре з кісточками насіння	44,0	28,0
5.	АР-3000	Малинове пюре без кісточок насіння	75	-

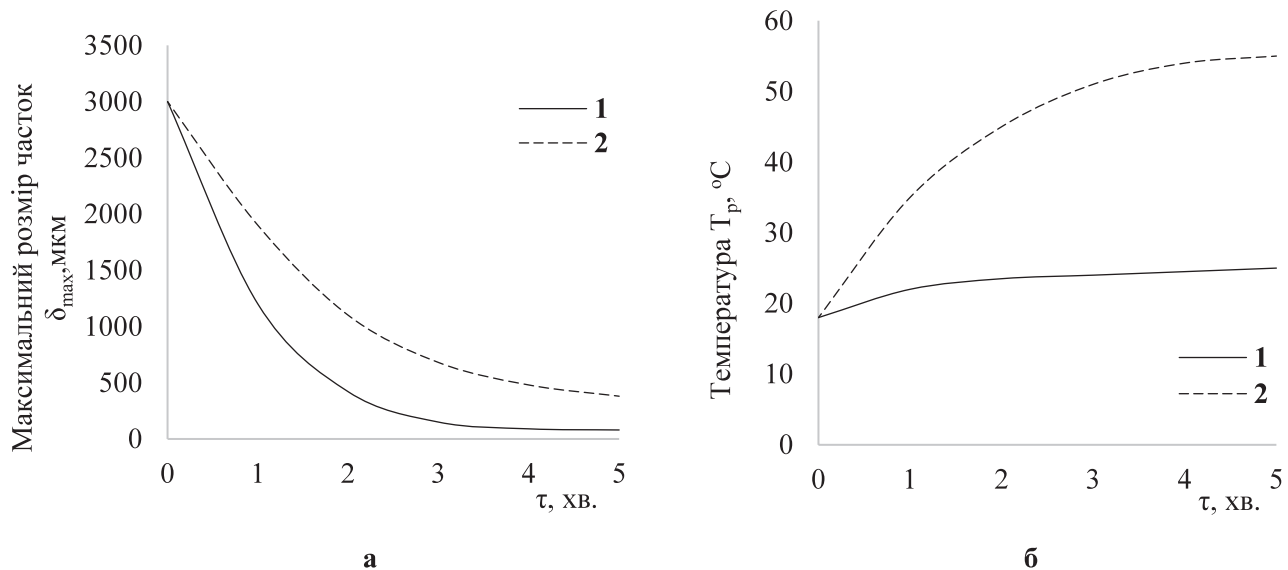


Рис. 2. Кінетичні залежності: а) ступеня дисперсності малинової гетерогенної системи і б) її температури від часу ДІВЕ-обробки: 1 – БГ-3; 2 – АР-3000

(крива 2, рис. 2, б), що може спричинити руйнування термолабільних біоактивних речовин вихідного сировинного продукту.

Таким чином, одержання ягідних гетерогенних систем із заданими дисперсними характеристиками у найменший час при незначному нагріванні було досягнуто в РПА марки БГ-3.

Фруктово-овочеві композиції, підготовлені з абрикосів та моркви (АМ-композиції), де кількість пробланшованої моркви складала $\leq 15\%$ від загальної маси сухих речовин композиції, попередньо подрібнювались у шнековому апараті. Одержані після шнекового подрібнювача АМ-композиції представляли собою пастоподібні маси з дисперсними частинками розміром $\delta \leq 1600-3200$ мкм, що на порядок вище заданих показників дисперсності для плодових гетерогенних систем і вимагало додаткової ДІВЕ-обробки у роторно-пульсаційному апараті.

В досліді №1 за 5 хв. обробки в апараті АР-3000 в режимі рециркуляції АМ-композиція набувала консистенції більш ущільненої в'язкої нетекучої маси. Для надання їй текучого стану в пасту була введена вода, в результаті чого вміст сухих речовин з 11,2% знизився до 8,0%, що не сприяло одержанню високоякісного порошку при подальшому висушуванню: порошок був темнішого відтінку і доволі гігроскопічним.

Після ДІВЕ-обробки такої ж нетекучої АМ-композиції з $C_0 = 14,0\%$ з введеною у різній кількості патокою як біополімерною добавкою вміст сухих речовин у гетерогенних системах збільшився і складав:

- в досліді №2 - $C_0 = 23,5\%$ (АМ-композиція : патока = 1:1) і

- в досліді №3 - $C_0 = 27\%$ (АМ-композиція : патока = 1:1,5), при цьому вони набули більш текучого стану, що важливо для одержання однорідного за дисперсним складом крапель факелу розпилу і рівномірного їх висушування у розпилювальній сушарці. Одержані в подальшому партії порошків АМ-композицій з патокою були яскравого помаранчевого кольору з приємним абрикосовим смаком і запахом, а за відсутністю гігроскопічних властивостей зберігали свою однорідність і сипкість понад 1 рік.

Як видно з кінетичних залежностей $\delta_{\max} = f(\tau)$ (рис. 3, а), за 5 хв. обробки в апараті АР-3000 максимальні розміри часток АМ-композиції складали $\delta_{\max} \leq 400$ мкм (крива 2), що в 4 рази більше за максимальні розміри часток після апарату БГ-3 (крива 1). Цілком очевидно, що одержання заданих дисперсних параметрів гетерогенної системи АМ-композиції в РПА циліндричного типу БГ-3 обумовлений збільшенням на одну одиницю у порівнянні з першим апаратом (АР-3000) набором робочих органів (статор/ротор/статор) і більшою його потужністю. (табл. 1). Відмічалось, що температура АМ-композиції в обох апаратах збільшилась всього до 27-30°C (рис.3, б), що важливо для збереження біоактивних складових речовин плодової сировини.

Як показав мікроструктурний аналіз, після ДІВЕ-обробки в апараті БГ-3 АМ-композиція з патокою

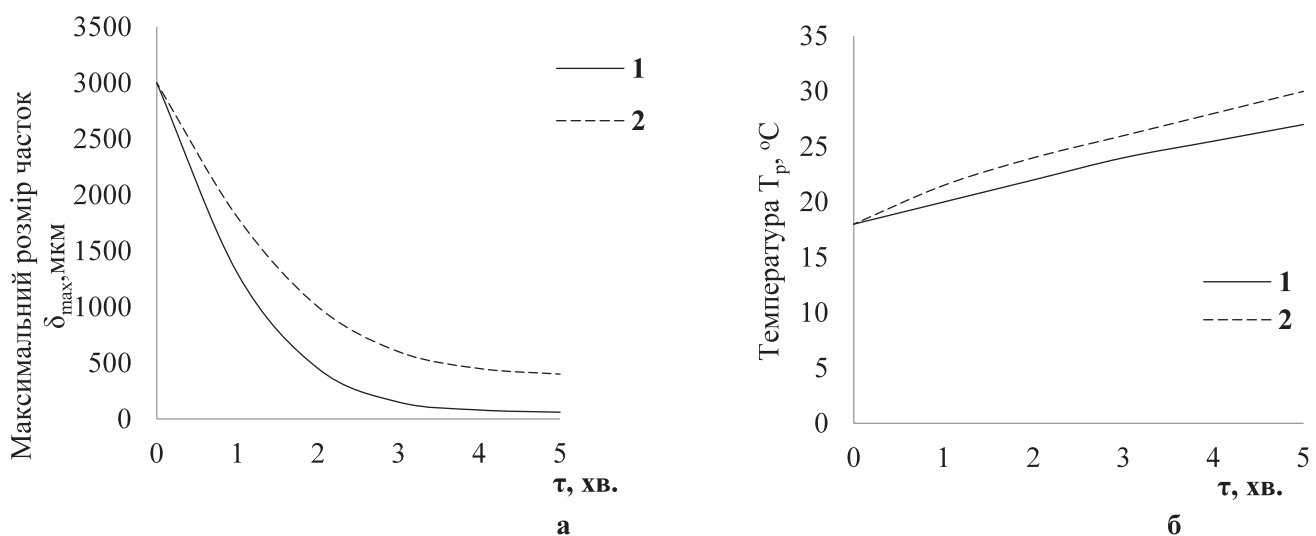


Рис. 3. Кінетичні залежності: а) ступеня дисперсності гетерогенної системи АМ-композиції і б) її температури від часу ДІВЕ-обробки: 1 – БГ-3; 2 – АР-3000

(дослід №3) містила ~90% часток розміром 20-80мкм, решта часток (до 10%) мала розміри $\delta_{\max} \leq 100 \dots 150$ мкм, що відповідає вимогам до дисперсного складу плодкових гетерогенних систем.

Мікроструктурний аналіз дисперсних часток послідовно відібраних на кожній хвилині ДІВЕ-обробки проб АМ-композицій показав не тільки динаміку зменшення розмірів часток продовж усіх 5хв., а й доступність, прозорість і незахищеність клітинної будови зрізів клітковини і волокнистих фрагментів структур, які вимагали локального їх обволікання захисним шаром посиленого декстринами, вуглеводами або білками складу завдяки введенню біополімерним добавкам.

За результатами мікроструктурного аналізу було встановлено, що вже на 2-й хв. ДІВЕ-обробки в апараті БГ-3 розміри часток АМ-композиції без патоки склали $\delta_{\max} < 450$ мкм (крива 1, рис. 3, а), а об'єм рідкої фази гетерогенної системи збільшувався настільки, що покращились умови для розчинення біополімерної добавки - патоки. Тобто, введення патоки до плодкових мас має відбуватись саме на 2-й хвилині їх ДІВЕ-обробки, що сприяє обволіканню дисперсних часток, що творених під час деструкції структурних систем плодів, і, тим самим, консервації їх у дисперсійному середовищі гетерогенної системи до подачі в сушарку.

Овочевий продукт, поставлений однією з агрофірм південного регіону України у формі охолодженого пюре зі свіжих томатів без смакових або стабілізуючих добавок, мав стан щільної нетекучої маси з частинка-

ми розміром 1600-3200мкм, через що підлягав ДІВЕ-обробці до заданого ступеня дисперсності.

Томатне пюре за близьких з наведеними вище плодковими гетерогенними системами показників рН (табл. 2) відрізнялось від ним більшим вмістом сухих речовин (20%) і схильністю до піноутворення під час тривалої гідромеханічної обробки, що призводило до збільшення її об'єму.

Дослідження з томатним пюре проводились як без біополімерних добавок, так і з додаванням патоки у кількості від 20% до 50% від загальної маси сухих речовин.

За кінетичними залежностями $\delta_{\max} = f(\tau)$ (рис. 4, а) заданий ступінь дисперсності гетерогенної системи томатного пюре із патокою при їх співвідношенні як 1:1, досягався за 3хв. в апараті БГ-3 (крива 1). На 5-й хв. ДІВЕ-обробки максимальні розміри часток зменшувались до рівня $\delta_{\max} \leq 80$ мкм, при цьому температура гетерогенної системи не перевищувала $T_{\text{суп}} = 28^\circ\text{C}$ (крива 1, рис. 4, б), чому сприяло введення патоки.

Максимальні розміри часток цієї ж композиції за 3 хв гідромеханічної обробки в апараті АР-3000 склали $\delta_{\max} \leq 1600$ мкм, а за 5хв. обробки - $\delta_{\max} \leq 1215$ мкм (крива 2, рис. 4, а), що на порядок вище за результати обробки в апараті БГ-3, при цьому температура продукту за цей час зросла до 45°C (крива 2, рис. 4, б)

Слід зауважити, що за меншого вмісту патоки у складі томатної композиції (20-25% від загальної маси С.Р.) погіршувалась результативність ДІВЕ-обробки.

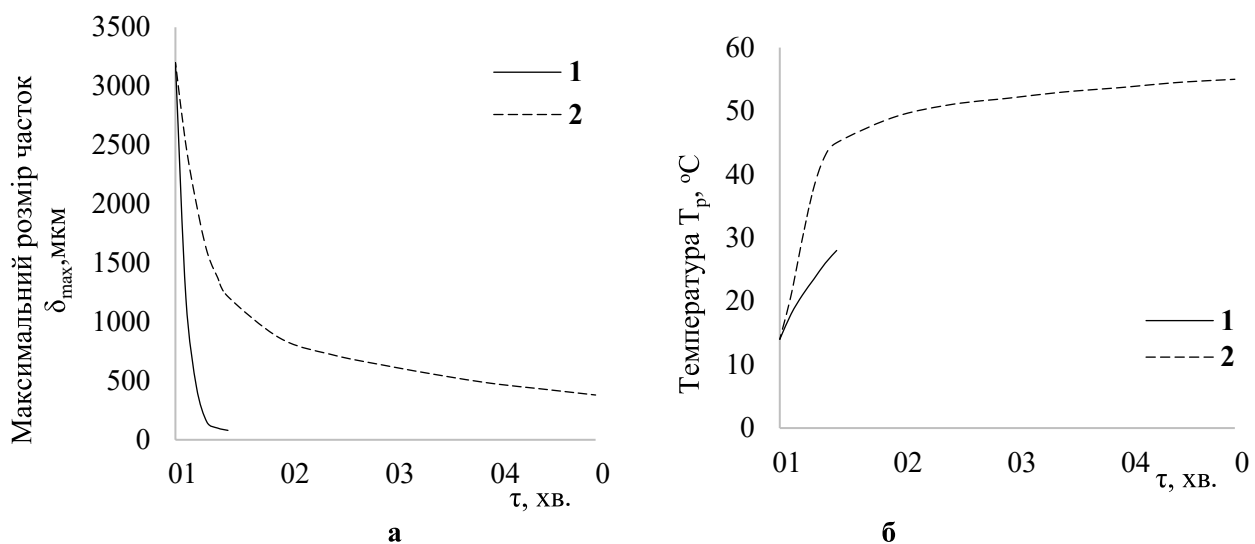


Рис. 4. Кінетичні залежності: а) ступеня дисперсності гетерогенної системи томатного пюре з патокою у співвідношенні 1:1 і б) її температури від часу ДІВЕ-обробки: 1 – БГ-3; 2 – АР-3000

Так, за 5хв. обробки в апараті БГ-3 максимальний розмір часток складав лише $\delta_{\max} \leq 300-350$ мкм, а в апараті АР-3000 – у 4 рази більший - $\delta_{\max} \leq 1450$ мкм.

Для одержання більшого ступеня дисперсності томатної композиції обробку її в апараті АР-3000 було продовжено, що викликало ще більше її нагрівання: на 20-й хв. - до 52°C і на 40-й - до 55°C (крива 2, рис. 4, б). Проте заданого ступеня дисперсності досягти так і не вдалось: за 40 хв. гідромеханічної обробки максимальний розмір часток томатної композиції знизився лише до $\delta_{\max} \leq 380$ мкм (крива 2, рис. 4, а). Це, на наш погляд, пояснюється пружно-пластичними властивостями дисперсних частинок нерозчинних фракцій томатів, здатних прослизати крізь міждисківі і міжциліндрові просвіти робочих органів апарату АР-3000 в процесі ДІВЕ-обробки, що спостерігалось і при обробці деяких ягідних композицій.

Результатом тривалої (40хв.) ДІВЕ-обробки томатного пюре без патоки стало одержання спіненої нетекучої в'язкої маси, а з часом - гелеутворення. Такі небажані ефекти спостерігались при ДІВЕ-обробці багатьох плодкових мас без біополімерних добавок, що свідчить про доцільність їх введення до плодкових мас за умов максимального скорочення часу їх ДІВЕ-обробки, у т.ч. для уникнення перегрівання.

Висновки

Дослідження впливу ДІВЕ-обробки плодової сировини в РПА двох різних конструкцій дозволило визначити найбільш ефективний тип апарату та умови, при яких процес нормалізації за дисперсним складом, стабілізації показників кислотності та покращення текучих властивостей ГС як об'єктів розпилювального сушіння незалежно від виду плодової сировини можна досягти за лічені хвилини при мінімальному прогріванні термолабільного сировинного матеріалу.

Експериментально встановлено, що в РПА циліндричного типу марки БГ-3 за 3-5хв. досягається одержання достатньо текучої і структурованої, нормалізованої за дисперсним складом ($\delta_{\max} \leq 100-150$ мкм) і стабілізованої за показниками рН на рівні ≥ 4 плодової гетерогенної системи, температура якої не перевищує 25-28°C, що дозволяє за умов введення біополімерної добавки (крохмальної патоки) на 2-й хв. ДІВЕ-обробки плодової гетерогенної системи досягти консервуючого ефекту і, тим самим, зберегти термолабільні біоактивні речовини вихідної сировини у її дисперсійному середовищі до моменту подачі її в сушарку.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Saeid Jafari, Seid Mahdi Jafari, Mahdi Ebrahimi, Isaya Kijpatanasilp, Kitipong Assatarakul*, A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: Characterization, food application and in vitro gastrointestinal digestion, *Food Hydrocolloids*, Volume 134, 2023, 108068, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108068>.
2. *Mohammad Rezaul Islam Shishir, Wei Chen*, Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices, *Trends in Food Science & Technology*, Volume 65, 2017, Pages 49-67, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>.
3. *Долинский А.А., Турчина Т.Я., Жукотський Е.К.* Сучасні методи впливу на структуроутворюючі властивості складних матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння / Наукові праці ОНАХТ. 2014. Вип. 45, Т.3. С. 13-17.
4. *Zhang Fei, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou*, Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder, *Particuology*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.017>.
5. *Andrea Bassani, Daniele Carullo, Francesco Rossi, Cecilia Fiorentini, Guillermo D. Garrido, Gintaras V.R. Reklaitis, Irene Bonadies, Giorgia Spigno*, Modeling of a spray-drying process for the encapsulation of high-added value extracts from food by-products, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 161, 2022, 107772, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107772>.
6. *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*, Volume 63, 2017, Pages 91-102, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>.
7. *Шаркова Н.А., Жукотський Э.К., Турчина Т.Я., Декуша А.В., Макаренко А.А.* Дослідження впливу ДІВЕ-обробки плодового тіла гриба шіітаке на фізико-механічні властивості грибної суспензії. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т.41, № 1. С. 27-33.
8. *Дьяконова А.К., Безусов А.Т.* Структурообразование в производстве консервированных продуктов. Одесса: «Optimum». 2006. 249 с.
9. *Dolinsky A. A., Maletskaya K. D., Snezhkin Y.* Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods. *Drying technology*, 2000. 18(3), 747-758.
10. *Басок Б.И., Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р.* Энергосберегающая безотходная технология гомогенизации плодовоовощного и цитрусового сырья. *Промышленная теплотехника*. 2003. Т.25, №4. С. 90-94.

11. *Saygi G., Erbay G., Koca N., Pazır N.* Energy and exergy analyses of spray drying of a fruit puree (cornelian cherry puree). *International Journal of Exergy*. 2015 Vol.16, No.3.
12. *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.
13. *Bastos Daniele, Gonçalves Maria, Andrade Cristina, de Lima Araujo Katia, Rocha-Leão Maria Helena.* Microencapsulation of cashew apple (*Anacardium occidentale*, L.) juice using a new chitosan-commercial bovine whey protein isolate system in spray drying. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. 90. 683-692. Doi: 10.1016/j.fbp.2012.04.005.

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF
DPEI-TREATMENT AND BIOPOLYMER
ADDITIVES ON THE CHARACTERISTICS
OF FRUIT HETEROGENEOUS SYSTEMS AS
OBJECTS OF SPRAY DRYING**

**Turchina T.Ya¹, Avdieieva L.Yu.², Makarenko A.A.³,
Kozak M.M.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, <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

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

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

⁴<https://orcid.org/0000-0003-2589-4998>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.3>

This research focuses on the crucial stage of raw material preparation in spray drying technologies, as it defines the potential properties of liquid heterogeneous systems and the characteristics of the resulting powder. The objective of this study was to examine the influence of DPEI treatment on different types of fruit and vegetable raw materials in two types of rotor-pulsation apparatus, along with the introduction of biopolymer additives, on the characteristics of obtained heterogeneous systems destined for spray drying. The article presents the results of investigating the effects of two types of rotor-pulsation apparatus, as well as the physico-chemical and morphological peculiarities of fruit and vegetable raw materials, on the dispersion process to obtain water suspensions with specified dispersion and structural-mechanical properties. Challenges encountered during the drying process of plant-based raw materials are highlighted, and the characteristics of the obtained suspensions (temperature, pH, degree of dispersion, flowability) after hydro-mechanical processing of heterogeneous systems are presented. The necessity of using biopolymer additives is justified. Three types of fruit and vegetable compositions were utilized in the research: berry, fruit-vegetable, and vegetable. To enhance thermal stability and improve structural, moisture-conductive, and structural-

mechanical properties of the heterogeneous systems, as well as to create optimal conditions for subsequent spray drying, biopolymer additives such as starch syrup and whey protein concentrate were employed.

Based on the experimental and analytical investigations, it was determined that the introduction of structuring biopolymer additives during the first 2 minutes of hydro-mechanical treatment of fruit and vegetable masses improved their flowability and thermal stability during subsequent drying. This approach also resulted in pH stabilization at a level of ≥ 4.0 , preservation of newly formed nano- and micro-particles of insoluble fractions and other thermolabile substances of the raw material in the dispersed medium of the heterogeneous system until it was fed into the spray dryer.

Key words: municipal solid waste, RDF, thermal analysis, destruction, decomposition, heat of combustion.

References 13, tables 3, figures 4.

1. Saeid Jafari, Seid Mahdi Jafari, Mahdi Ebrahimi, Isaya Kijpatanasilp, Kitipong Assatarakul, A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: Characterization, food application and in vitro gastrointestinal digestion, *Food Hydrocolloids*, Volume 134, 2023, 108068, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108068>.

2. Mohammad Rezaul Islam Shishir, Wei Chen, Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices, *Trends in Food Science & Technology*, Volume 65, 2017, Pages 49-67, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>.

3. Долинский А.А., Турчина Т.Я., Жуковський Е.К. Сучасні методи впливу на структуроутворюючі властивості складних матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння / Наукові праці ОНАХТ. 2014. Вип. 45, Т.3. С. 13-17.

4. Zhang Fei, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou, Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder, *Particuology*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.017>.

5. Andrea Bassani, Daniele Carullo, Francesco Rossi, Cecilia Fiorentini, Guillermo D. Garrido, Gintaras V.R. Reklaitis, Irene Bonadies, Giorgia Spigno, Modeling of a spray-drying process for the encapsulation of high-added value extracts from food by-products, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 161, 2022, 107772, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107772>.

6. 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*, Volume 63, 2017, Pages 91-102, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>.

7. Шаркова Н.А., Жукотский Э.К., Турчина Т.Я., Декуша А.В., Макаренко А.А. Дослідження впливу ДІВЕ-обробки плодового тіла гриба шіїтаке на фізико-механічні властивості грибної суспензії. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т.41, № 1. С. 27-33.
8. Дьяконова А.К., Безусов А.Т. Структурообразователи в производстве консервированных продуктов. Одесса: «Optimum». 2006. 249 с.
9. Dolinsky A. A., Maletskaya K. D., Snezkin Y. Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods. Drying technology, 2000. 18(3), 747-758.
10. Басок Б.И., Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р. Энергосберегающая безотходная технология гомогенизации плодовоовощного и цитрусового сырья. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25, №4. С. 90-94.
11. Saygi G., Erbay G., Koca N., Pazir N. Energy and exergy analyses of spray drying of a fruit puree (cornelian cherry puree). International Journal of Exergy. 2015 Vol.16, No.3.
12. 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.
13. Bastos Daniele, Gonçalves Maria, Andrade Cristina, de Lima Araujo Katia, Rocha-Leão Maria Helena. Microencapsulation of cashew apple (Anacardium occidentale, L.) juice using a new chitosan-commercial bovine whey protein isolate system in spray drying. Food and Bioproducts Processing. 2012. 90. 683-692. Doi: 10.1016/j.fbp.2012.04.005.

Отримано 25.07.2023

Received 25.07.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024