

УДК 532.5; 544.77

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІКОМПОНЕНТНОГО КОМПЛЕКСУ ВУГЛЕВОДІВ З ГАРБУЗОВИМ ПЮРЕ

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

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

¹ст. наук. співр., ст. досл tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

²пров. наук. співр., ст. наук. співр., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

³ст. наук. співр., ст. наук. співр., tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

⁴ст. наук. співр., ст. досл tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-8829-8221>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.6>

У роботі досліджено вплив мальтодекстрину, крохмалю та сахарози на реологічні властивості композицій з гарбузовим пюре. Встановлено, що всі зразки мають псевдопластичну поведінку, а використання вуглеводних комплексів різного складу знижує їхню в'язкість. Це дозволяє регулювати властивості дисперсних систем і оптимізувати режими сушіння методом розпилювання при виробництві порошкових харчових продуктів.

This study investigates the effect of maltodextrin, starch, and sucrose on the rheological properties of pumpkin puree-based compositions. All samples exhibited pseudoplastic behavior, while the use of carbohydrate complexes of different compositions reduced their viscosity. These findings make it possible to regulate the properties of disperse systems and optimize spray-drying modes in the production of powdered food products rich in fruit and vegetable raw materials.

Бібл. 18, табл.1, рис. 3.

Ключові слова: гарбузове пюре, реологія, мальтодекстрин, крохмаль, сахароза, багатокомпонентна система.

Постановка проблеми. Фруктово-овочева сировина представляє собою складні багатокомпонентні системи зі складними структурно-механічними та теплофізичними властивостями. Їх переробка в сухі порошкові продукти вимагає використання спеціальних методів і режимів обробки, а також використання структуруючих добавок. Для наукового обґрунтування технологій і конструктивно-режимних параметрів обладнання, необхідно мати достовірну інформацію про реологічну поведінку сировини. Реологічні дослідження є надійним інструментом для визначення структурних і функціональних властивостей кожного компонента і прогнозування його поведінки при використанні в полікомпонентних композиціях

Особливу увагу привертають композиції на основі гарбузового пюре як джерела природних біологічно активних речовин. Однак, висока в'язкість через наявність жорсткої структури полімерного каркасу з харчових волокон ускладнюють його подальшу переробку із застосуванням тепломасообмінних процесів. Зокрема в умовах упарювання і розпилювального сушіння висока в'язкість знижує ефективність тепловологопереносу, сприяє посиленню адгезійних властивостей і налипанню частинок на стінках сушильної камери.

Дослідження зміни в'язкості гарбузового пюре при включенні різних вуглеводних компонентів дозволить підвищити ефективність сушіння, забезпечити стабільність структури готового продукту та зберегти біологічно активні речовини, що є актуальним. Отримані результати дозволять обґрунтувати вибір режимів попередньої гідромеханічної обробки та оптимізувати параметри тепломасообміну в процесах виготовлення порошкових напівфабрикатів з функціональними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Полісахариди – це природні біополімери з низькою токсичністю, високою біосумісністю та біорозкладністю, які мають різні фізичні, хімічні і біологічні властивості. Спільною рисою рослинних полісахаридів є їхня стабільна структура завдяки сильним міжмолекулярним взаємодіям, що ускладнює їх деформацію при зміні рН та температури. Крім того, вони мають сильну гідрофільність та в'язкість, що може змінювати реологічні властивості рідкої системи. Вони широко використовуються в харчовій промисловості, в т.ч. у виробництві спортивного харчування, як функціональні інгредієнти через їх фізіологічні властивості в організмі людини. Багато полісахаридів, виділених з харчових

джерел, є гідрофільними або амфільними полімерами, які мають лінійну або розгалужену просторову структуру. Завдяки цьому деякі з них добре розчиняються у воді, здатні згущувати водні розчини, утворювати гідрогелі, стабілізувати емульсії або суспензії. Неперетравлені полісахариди (харчові волокна, клітковина) мають сприятливий вплив на роботу шлунково-кишкового тракту, серцево-судинної системи та ін. Функціональні і структурні властивості полісахаридів визначаються їх молекулярними характеристиками, такими як молекулярна маса, конформація, гідрофобність і електричний заряд [1-3].

Включення простих і складних вуглеводів до складу дисперсних систем є одним з найбільш ефективних способів стабілізації їх структури та корекції реологічних властивостей. Такі полімери, як мальтодекстрин, крохмаль і сахароза широко застосовуються як функціональні добавки завдяки здатності впливати на текстуру, в'язкість, теплофізичні характеристики та біодоступність поживних речовин [2]. Їх використання дає можливість модифікувати структуру і формувати стійкі гетерогенні системи з прогнозованими властивостями при тепломасообмінних процесах обробки, а також транспортуванні та зберіганні.

Одним із таких важливих полісахаридів, який використовується при створенні спортивного харчування є мальтодекстрин. В харчовій промисловості мальтодекстрин широко використовують в якості загущувача, стабілізатора, наповнювача, а також замітника жиру для зниження калорійності продуктів. Такі властивості дозволяють його використання у раціональному, оздоровчому, дієтичному і лікувальному харчуванні [2, 4].

Багаторічні дослідження світових вчених [5, 6], в тому числі і наші дослідження [7], показали, що застосування мальтодекстрину дозволяє покращити умови розпилювального сушіння складних багатокомпонентних матеріалів і отримати сухі порошкові матеріали високої якості. При розпилювальному сушінні мальтодекстрин сприяє покращенню загальних умов структурування рідинного матеріалу, ефективному тепловологопереносу і зниженню проявів адгезійних властивостей сухих частинок [8].

Окрім мальтодекстрину до складу спортивного харчування можуть бути включені і інші вуглеводи: швидкі – моносахариди (глюкоза, фруктоза), дисахариди (сахароза) і повільні – полісахариди (мальтодекстрин, крохмаль, харчові волокна). Кожен із представлених компонентів, доданий до рідких гетерогенних систем, відрізняється швидкістю та ступенем засвоєння, а також може змінювати теплофізичні, фізико-хімічні та

структурно-механічні властивості всієї системи. Також зміна складу і співвідношення компонентів призводить до зміни всіх властивостей системи в цілому.

Багато наявних публікацій зосереджуються на реології окремих інгредієнтів або розглядають вплив лише одного чинника. Зокрема у дослідженні авторів [9] проаналізовано вплив вмісту розчинних сухих речовин і температури на реологічні властивості персикового пюре. Було встановлено, що підвищення концентрації сахарози призводить до зростання в'язкості та коефіцієнта консистенції, тоді як підвищення температури, навпаки, знижує в'язкість. Крім того, автори зафіксували, що низький вміст сахарози спричиняє збільшення швидкості седиментації, що корелює з низьким дзета-потенціалом колоїдної системи. Це свідчить про важливу роль сахарози не лише як солубілізатора, а і як стабілізуючого агента у фруктових пюре. При дослідженні впливу сахарози на реологічні властивості дисперсних систем автори [10] встановили, що сахароза змінює реологічну поведінку переважно через вплив на масову концентрацію і форми зв'язування води: при вищих концентраціях (6–10%) зростає частка вільної вологи, що негативно впливає на ріст дріжджів, тоді як при 2% спостерігається оптимальний розподіл слабко зв'язаної води, що забезпечує гідrataцію білкових структур і стабільність матриці. Таким чином, рівень сахарози в системі впливає не лише на в'язкість і текстуру, але й на кінетику біохімічних процесів, що важливо враховувати при формуванні стабільних рідких або напівтвердих гетерогенних систем, зокрема у контексті тепломасообміну при сушінні.

Також важливим напрямом досліджень є вивчення впливу крохмалю як функціонального компонента на реологічну стабільність пюреподібних систем. Автори [11] показали, що додавання 10% ретроградованого крохмалю з високим вмістом амілози (RHS) до персикового пюре сприяло збереженню в'язкості, зменшенню синерезису та підвищенню стабільності системи протягом 14 днів зберігання. Зокрема, порівняно з крохмалем з нормальним вмістом амілози (RNS), RHS забезпечував вищу здатність до відновлення після деформації, а також зберігав у системі значний вміст резистентного крохмалю (10%), який залишався стабільним під час зберігання. Це свідчить про те, що тип крохмалю критично впливає не лише на текстурні властивості, а й на здатність системи до стабілізації та взаємодії з водою. Такі результати є цінними у контексті створення полікомпонентних систем із заданими реологічними та теплофізичними характеристиками для подальшої сушіння.

Комплексне вивчення систем на основі гарбузового пюре з різними типами вуглеводів — як швидкодіючих (сахароза), так і повільнодіючих (мальтодекстрин, крохмаль) — з урахуванням температурного впливу та кутової швидкості зсуву залишається недостатньо дослідженим. Це особливо актуально у контексті подальшого вибору раціональних режимів енергоефективних сушильних процесів.

Мета дослідження — визначити закономірності зміни реологічних властивостей полікомпонентних композицій на основі гарбузового пюре з різними видами вуглеводів (мальтодекстрином, сахарозою, крохмалем) під впливом температури та швидкості зсуву з метою оптимізації процесів тепломасообміну при розпилювальному сушінні.

Матеріали і методи роботи.

У дослідженні використовували наступну сировину: Гарбуз мускатного сорту «Медова красуня», що відповідає ДСТУ 3190-95 Гарбузи продовольчі свіжі. Технічні умови.; Мальтодекстрин харчовий «Maltodextrin DE 15-20» з наступними характеристиками: декстрозний еквівалент 15–20, масова частка основної речовини $\geq 99\%$, рН 1% розчину 4,5–6,5, країна походження Китай; Крохмаль харчовий кукурудзяний із вмістом основної речовини не менше 98%. Країна походження – Україна; Сахарозу харчову (цукор-пісок) вищого ґатунку, з масовою часткою сахарози $\geq 99,9\%$, без домішок редуруючих цукрів. Продукт відповідає вимогам ДСТУ 4623:2023 Цукор. Технічні умови. Країна походження – Україна.

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

Для характеристики реологічних властивостей гарбузового пюре використовували метод вимірювання динамічної в'язкості за допомогою ротаційного віскозиметра Brookfield LVDV-E. Для зменшення похибки при визначеннях був використаний циліндричний шпиндель 63 з діапазоном вимірювання від 2,0 мПа*с

до 60 000 мПа*с. Дослідження проводили при умовах термостатування продукту при температурах 20 ± 2 °С, 40 ± 2 °С, 60 ± 2 °С і кутовій швидкості від 0,21 рад/с до 10,5 рад/с. Після підготовки зразків до вимірювань їх залишали на 5-10 хвилин для відновлення структурних міжмолекулярних зв'язків і вирівнювання температури проби.

Для дослідження було підготовлено три композиційні зразки, які відрізнялися якісним та кількісним складом вуглеводних компонентів. Суспензії готували шляхом попереднього механічного перемішування, після чого проводили гідродинамічне диспергування методом дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) у РПА. Склад кожної композиції наведено в таблиці 1.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів

Проведені дослідження ефективної в'язкості композиції гарбузового пюре з мальтодекстрином (зразок 1) за різних температур підтвердили її неньютонівську псевдопластичну поведінку. Така система демонструє непропорційне зниження в'язкості зі збільшенням кутової швидкості зсуву. У діапазоні низьких швидкостей (до $0,2 \text{ c}^{-1}$), коли структура композиції залишається практично незруйнованою, спостерігаються дуже високі значення ефективної в'язкості — від 24 000 до 31 000 мПа*с. При цьому вищі значення відповідають нижчим температурам. Подальше зростання кутової швидкості до $0,63 \text{ c}^{-1}$ зумовлює найінтенсивніше зниження в'язкості, що свідчить про активне руйнування структури системи. В інтервалі швидкостей до 5 c^{-1} темп зниження в'язкості поступово уповільнюється, а при ще вищих швидкостях система переходить у стан практично повністю зруйнованої структури, що характеризується стабільними, але досить високими значеннями в'язкості. Підвищення температури процесу зумовлює зниження в'язкості: при температурі 40 ± 2 °С значення зменшуються на 32,6 %, а при 60 ± 2 °С — на 42 % порівняно з початковими показниками.

Табл. 1. Рецептний склад композиційних зразків із різним вмістом вуглеводних компонентів, мас. %

Table 1. Formulation of composite samples with different carbohydrate contents, wt %

Інгредієнти	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Гарбузове пюре	50	50	46
Мальтодекстрин	50	35	31
Крохмаль кукурудзяний	0	0	8
Сахароза	0	15	15
Всього	100	100	100

Утворена структура характеризувалась високою дисперсністю, однорідністю, стабільністю і більшою гладкістю, порівняно до зразка гарбузового пюре з відповідним гідромеханічним ступенем обробки [12].

Порівняльний аналіз реологічних характеристик чистого гарбузового пюре та композиції на його основі з мальтодекстрином (у співвідношенні 1:1) за кутової швидкості зсуву $5,23 \text{ c}^{-1}$ при температурах $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ та $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ показав, що додавання мальтодекстрину сприяє підвищенню загального вмісту сухих речовин, але при цьому знижує ефективну в'язкість композиції в зоні гранично зруйнованої структури для всіх температур дослідження. Такий ефект, ймовірно, обумовлений здатністю сферичних молекул мальтодекстрину рівномірно розмішуватись між лінійними полісахаридними ланцюгами, характерними для гарбузового пюре, що призводить до підвищення дисперсності системи та ослаблення міжмолекулярної сітки. Зі зростанням температури спостерігається прогресивне зниження в'язкості композиційного зразка і збільшення різниці між в'язкістю чистого пюре та пюре з мальтодекстрином. Зокрема, при температурі $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ця різниця становить 8,4 %, при $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — 9,3 %, а при $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — 14,3 %. що пов'язано із послабленням сили існуючих міжмолекулярних зв'язків під дією температури і деформації. Структура цих зразків є однорідною, не схильною до розшарування. Порівняно до зразків гарбузового пюре консистенція є більш гладкою і рівномірною. Колір дещо світліший. Таким чином, можна зробити висновок про позитивний вплив мальтодекстрину на зниження в'язкості композиції і можливість регулювання реологічних властивостей дисперсної

системи у відповідності до апаратних особливостей технологічного потоку, що відповідає результатам робіт інших дослідників [2, 13].

Крім гарбузового пюре, яке має високу харчову і біологічну цінність і мальтодекстрину, реологічні властивості яких представлені раніше, до складу полікомпонентної суміші вуглеводів входить цукор(зразок 2). Цукор є обов'язковим компонентом багатьох харчових продуктів, в т.ч. спортивного харчування, де виконує функції смакової добавки і швидкого джерела енергії. Молекули сахарози мають високу гідрофільність, а також розчинність і взаємодію різних біополімерів, що призводить до зміни в'язкості дисперсних систем.

Дослідження реологічних залежностей поведінки полікомпонентної композиції вуглеводів (зразок 2) представлені на рис. 1.

Аналіз отриманих результатів (рис. 1) показав, що дослідні зразки під впливом напруження демонструють поведінку псевдопластичного матеріалу, тобто для ініціювання текучості у якому потрібна певна величина напруги (межа текучості) після якої дисперсна система починає текти і в'язкість зменшується зі збільшенням швидкості зсуву. Загалом, реологічна поведінка цього зразка відповідає результатам досліджень дисперсних систем із іншим вуглеводним складом із мальтодекстрином, представленим раніше. На одержаних кривих явно можна виділити три зони течії. В'язкість зразків в зоні максимально незруйнованої структури становить 12200–11000 мПа·с. Зона різкого падіння в'язкості знаходиться у вузькому діапазоні швидкостей від $0,2 \text{ c}^{-1}$ до $0,6 \text{ c}^{-1}$ внаслідок руйнування ван-дер-ваальсових сил зчеплен-

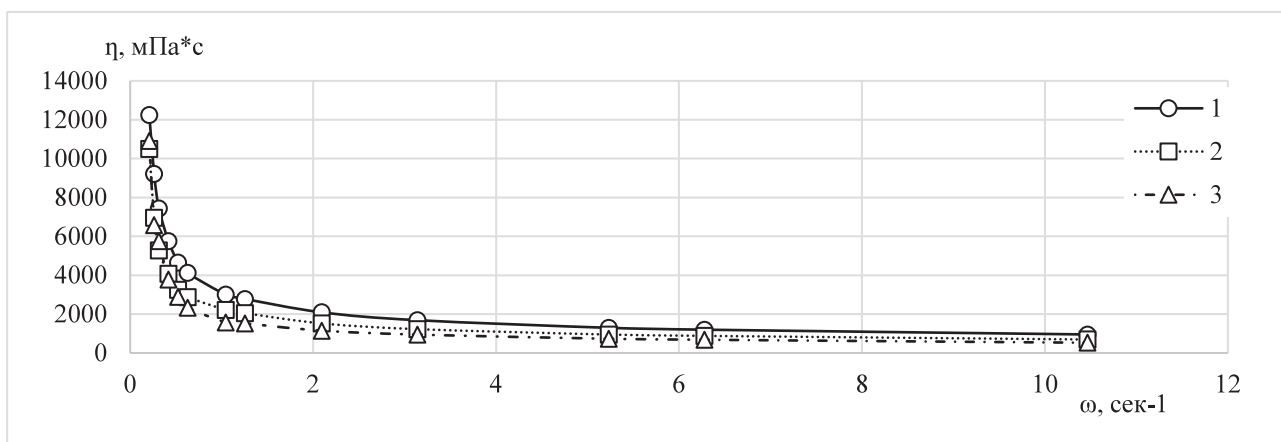


Рис. 1. Залежність динамічної в'язкості від кутової швидкості багатоконпонентної суміші вуглеводів (зразок 2) при різних температурах: 1 – $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $T=60 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 1. Dependence of dynamic viscosity on shear rate for a multicomponent carbohydrate mixture (sample 2) at different temperatures: 1 – $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $T=60 \text{ }^\circ\text{C}$

ня частинок структури. Зі збільшенням швидкості зсуву інтенсивність змінення в'язкості суттєво зменшується, відбувається неньютонівська течія малов'язкої системи. Зона ньютонівської течії починається при швидкостях від $5,2 \text{ с}^{-1}$. Мінімальна динамічна в'язкість становить $1300\text{--}700 \text{ мПа}\cdot\text{с}$. Отримані результати відповідають результатам робіт інших дослідників [14, 15].

Крохмаль, поряд із сахарозою, є одним з головних джерел енергії в харчуванні людини. Його технологічні властивості визначаються співвідношенням амілози й амілопектину, що впливає на здатність до загущення, гелеутворення та клейстеризації. В'язкість розчинів крохмалю зростає з концентрацією та знижується з вмістом амілози, а також залежить від температури та присутності інших компонентів. Зокрема, дисахариди знижують в'язкість і міцність гелів, діючи як пластифікатори. Знання цих особливостей є важливим для регулювання текстури продуктів та оптимізації технологічних процесів [16].

Результати досліджень полікомпонентних композицій вуглеводів з крохмалем (зразок 3) представлені на рис. 2

Аналіз отриманих результатів (рис 2) показав, що дослідні зразки відносяться до псевдопластичних матеріалів. При утворенні полікомпонентної суміші зерна крохмалю рівномірно розподіляються між іншими високомолекулярними молекулами, утворюючи із ними стійку однорідну тривимірну структуру за рахунок взаємодії міжмолекулярних зв'язків між частинками і молекулами.

При низьких кутових швидкостях зсуву (до $0,2 \text{ с}^{-1}$) в'язкість багатокомпонентної композиції є

високою через сильну міжмолекулярну взаємодію та неповне руйнування структури. Зі збільшенням швидкості до $5,2\text{--}6,3 \text{ с}^{-1}$ в'язкість зменшується — руйнування структури починає переважати над її відновленням, а макромолекули орієнтуються вздовж напрямку зсуву. Амілопектинові ланцюги частково розплутуються, а інші полісахариди (мальтодекстрин) сприяють зменшенню опору деформації потоку. При високих швидкостях структура повністю руйнується, а в'язкість знижується до $950\text{--}1100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Температура істотно впливає на реологію системи. За $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ вода повільно проникає у крохмальні гранули, спричиняючи набухання й утворення структурної сітки. На цьому етапі композиція виявляє псевдопластичні властивості. За швидкостей понад $0,42 \text{ с}^{-1}$ структура демонструє менше зниження в'язкості, а зразок проявляє елементи дилатантної поведінки через щільне розміщення крохмальних гранул. Внаслідок цього при $5,2 \text{ с}^{-1}$ в'язкість за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ на 33% вища, ніж при $40 \text{ }^\circ\text{C}$, і на 44% — ніж при $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

З підвищенням температури досліджень до $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ і вище у дослідній дисперсній системі у присутності води відбувається незворотне руйнування молекулярного порядку і напівкристалічної тривимірної структури полісахаридів і фазовий перехід крохмалю від високопорядкованої структури до неупорядкованої структури у воді. В результаті складної взаємодії між вуглеводами в'язкість всієї дисперсної системи при підвищених температурах знижується. Отримані результати відповідають результатам інших дослідників [17].

Для порівняльного аналізу реологічних властивостей зразків з різним полікомпонентним складом були

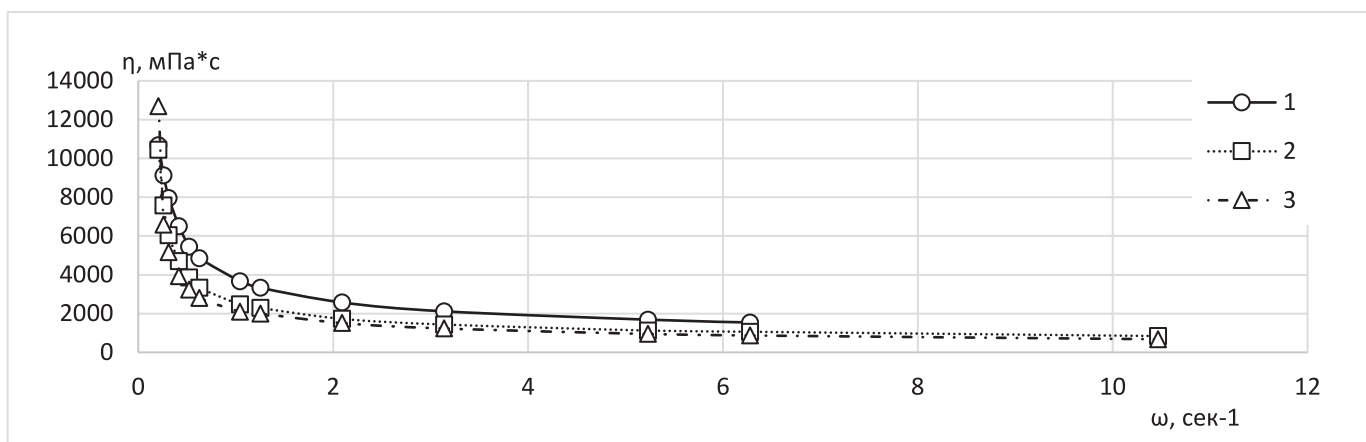


Рис. 2. Залежність динамічної в'язкості від кутової швидкості багатокомпонентної суміші вуглеводів (зразок 3) при різних температурах: 1 – $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $T=60 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 2. Dependence of dynamic viscosity on shear rate for a multicomponent carbohydrate mixture (sample 3) at different temperatures: 1 – $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $T=60 \text{ }^\circ\text{C}$

побудовані залежності ефективної в'язкості зразків в зоні гранично зруйнованої структури від температури. Порівняння результатів дозволить охарактеризувати вплив окремих компонентів і можливість їх сумісного використання для отримання системи із заданими структурно-механічними властивостями. Залежності значень ефективної в'язкості зразків побудовані при кутовій швидкості $5,23 \text{ c}^{-1}$ і температурі досліджень: $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $40 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 2^\circ\text{C}$. Результати представлені на рис. 3.

Аналіз властивостей дослідних зразків (рис. 3) показав, що збагачення гарбузового пюре додатковими вуглеводними компонентами суттєво змінює структурно-механічні властивості утвореної системи. Проведений аналіз результатів дозволив порівняти вплив різних компонентів на властивості утвореної багатокомпонентної системи з гарбузовим пюре.

В результаті порівняння різних зразків дисперсних систем в однакових умовах в зоні гранично зруйнованої температури встановлено, що внесення сахарози (дослідний зразок 2) найбільш суттєво вплинуло на зменшення значень в'язкості системи. Це пояснюється тим, що включення сахарози, як низькомолекулярної речовини до складу дисперсійного середовища, змінює властивості розчинника і сприяє розчинності біополімерів. Завдяки своїй здатності структурувати воду за допомогою утворення водневих зв'язків сахароза вступає у взаємодію з полімерами, змінюючи міжфазний натяг між фазами, поверхневу активність і здатність до утворення структурного каркасу з іншими макромолекулами. В результаті такого впливу в'язкість зразка зменшилась в середньому на 37% для всіх тем-

ператур. Отримані результати по зниженню в'язкості суміші при додаванні цукру відповідають результатам робіт інших дослідників [18].

Використання кукурудзяного крохмалю, який є природним загущувачем, призводить до деякого посилення структурної взаємодії і зміцнення каркасу утвореної структури (зразок 3). В результаті, при однаковій вологості зразків, значення динамічної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури підвищуються порівняно до попереднього зразка із сахарозою для всіх температур. Таку поведінку можна пояснити поступовим набуханням гранул крохмалю як полісахариду зі складною будовою до клейстеризації. В утвореній складній дисперсній системі (зразок 3) макромолекули крохмалю і мальтодекстрину рівномірно розподіляються між лінійними ланцюгами харчових волокон гарбузового пюре, що змінило співвідношення між компонентами, ступінь взаємного впливу і структурно-механічні властивості утвореної системи. Підвищення температури досліджень призводило до зниження значень в'язкості для всіх зразків, що пов'язано із послабленням сили існуючих міжмолекулярних зв'язків у високомолекулярних структурах під дією температури і деформації.

Висновки. Дослідження показали, що регулювання реологічних властивостей полікомпонентних композицій на основі гарбузового пюре можливе шляхом варіювання якісного та кількісного складу вуглеводних добавок. Отримані результати мають практичне значення для вдосконалення тепломасообмінних режимів у процесах сушіння, підвищення стабільності дисперсних систем, збереження біологічно активних компонентів та формування бажаних структурно-

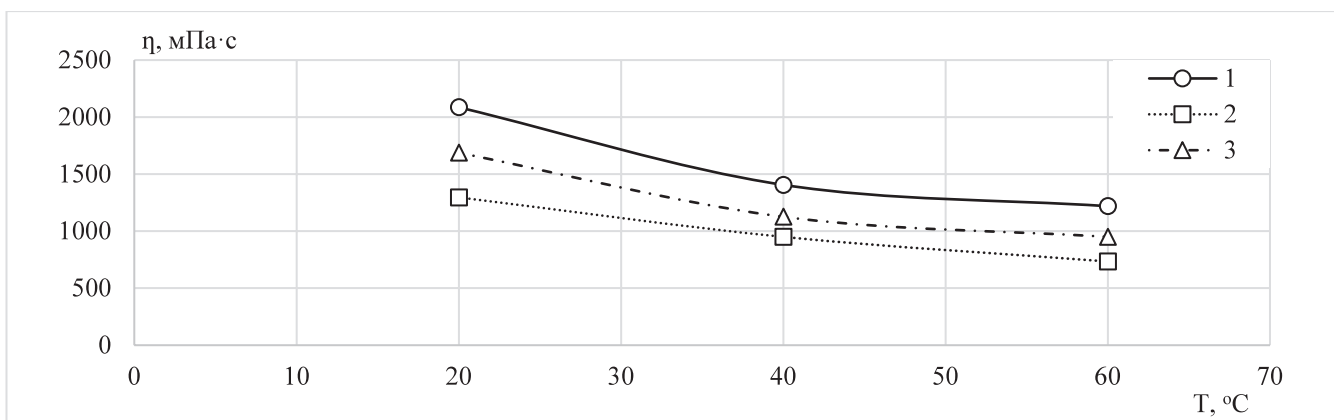


Рис. 3 Значення ефективної в'язкості при кутовій швидкості $5,23 \text{ c}^{-1}$ в залежності від температури для дослідних зразків багатоконпонентної композиції: 1 – зразок 1; 2 – зразок 2; 3 – зразок 3

Fig. 3. Effective viscosity at a shear rate of 5.23 s^{-1} depending on temperature for the experimental samples of multicomponent composition: 1 – sample 1; 2 – sample 2; 3 – sample 3

механічних властивостей кінцевого продукту. Вони можуть бути використані при створенні порошкових концентратів функціонального харчування, зокрема у сфері спортивної або дієтичної продукції.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bai L., Liu F., Xu X., Huan S., Gu J., McClements D.J. Impact of polysaccharide molecular characteristics on viscosity enhancement and depletion flocculation. *Journal of Food Engineering*. 2017. Vol. 207. P. 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.021>.
2. Turk-Gul A., Uргу-Ozturk M., Koca N. The effects of different amounts of maltodextrin on the rheological behaviour and stability of white cheese emulsions, and the physical, microstructural, chemical and sensory properties of white cheese powders. *International Dairy Journal*. 2023. Vol. 138. Article 105552. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105552>.
3. Shao P., Feng J., Sun P., Xiang N., Lu B., Qiu D. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides. *Food Research International*. 2020. Vol. 137. Article 109376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109376>
4. Chronakis I. S. On the molecular characteristics, compositional properties, and structural-functional mechanisms of maltodextrins: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1998. Vol. 38. P. 599–637.
5. Millinia, B.L.; Mashithah, D.; Nawatila, R.; Kartini, K. Microencapsulation of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Anthocyanins: Effects of Maltodextrin and Trehalose Matrix on Selected Physicochemical Properties and Antioxidant Activities of Spray-Dried Powder. *Future Foods* 2024, 9, 100300
6. Sia Y. J., Chua L. S., Nor N. F. A., Soo J., Sari E. Spray drying and characterisation of anthocyanin rich microcapsules from jaboticaba juice with maltodextrin // *Food Bioscience*. – 2025. – Vol. 68. – Article 106446. – ISSN 2212-4292. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106446>.
7. Turchyna, T., Avdieieva, L., & Makarenko, A. Prospects and impacts of innovative technology for processing natural fruit raw materials into powder form // *Selected Papers of EDSD of the VI International Conference "European dimensions of sustainable development"* (May 15–17, 2024, Kyiv). – 2024.
8. Valencia G.A., Zare E.N., Makvandi P., Gutiérrez T.J. Self-Assembled Carbohydrate Polymers for Food Applications: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019. Vol. 18. P. 2009–2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12499>
9. Kyroglou, S., Ritzoulis, C., Theocharidou, A., & Vareltzis, P. Physicochemical Factors Affecting the Rheology and Stability of Peach Puree Dispersions. *ChemEngineering*, V8, №6, 2024. 119. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8060119>
10. Xie Dongdong, Lei Yanan, Li Xing, Effect of sucrose levels on dynamic rheology properties of dough during fermentation process, *International Journal of Food Science and Technology*, Volume 58, Issue 3, March 2023, Pages 1326–1335, <https://doi.org/10.1111/ijfs.16291>
11. Dominguez-Ayala, J. E., Méndez-Montevalvo, G., Cabrera-Ramírez, A. H., Osorio-Díaz, P., Morales-Sánchez, E., & Velázquez, G. Rheological, functional properties, and stability of peach puree added with normal and high amylose retrograded starches. *СyTA - Journal of Food*, V 22 №1. 2024 <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2333900>
12. Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Дослідження динамічної в'язкості гарбузового пюре, зважаючи на вплив гідромеханічних і температурних факторів // *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. – 2024. – Т. 30, № 3. – С. 189–198. – DOI: [10.24263/2225-2924-2024-30-3-17](https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-17).
13. Chronakis I. S., Kasapis S., Richardson R. K. Small deformation rheological properties of maltodextrin-milk protein systems. *Carbohydrate Polymers*. 1996. Vol. 29, No. 2. P. 137–148. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(96\)00014-8](https://doi.org/10.1016/0144-8617(96)00014-8).
14. Dickinson E., Merino L. M. Effect of sugars on the rheological properties of acid caseinate-stabilized emulsion gels. *Food Hydrocolloids*. 2002. Vol. 16, No. 4. P. 321–331. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00105-9](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00105-9).
15. Parvar B., Razavi S. M. A. Rheological interactions of selected hydrocolloid–sugar–milk–emulsifier systems. *International Journal of Food Science & Technology*. 2012. Vol. 47, P. 854–860. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02918.x>.
16. Ahmad F. B., Williams P. A. Effect of sugars on the thermal and rheological properties of sago starch. *Biopolymers*. 1999. Vol. 50, No. 4. P. 401–412.
17. Erich von Borries-Medrano E., Jaime-Fonseca M.R., Aguilar-Méndez M. Á. Starch-galactomannans mixtures: Rheological and viscosity behavior in aqueous systems for food modeling. Y Zhenbo Xu (ed.), *Solubility of Polysaccharides*. Rijeka: IntechOpen, 2017. P. 5. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68915>.
18. Sadeghi F., Kadkhodae R., Emadzadeh B., Nishinari K. Effect of sucrose on phase and flow behavior of protein-polysaccharide mixtures. *Food Hydrocolloids*. 2021. Vol. 113. Article 106455. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106455>.

STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF A MULTICOMPONENT CARBOHYDRATE COMPLEX WITH PUMPKIN PUREE

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

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

¹PhD (Engin.), Senior Researcher <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

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

³PhD (Engin.), Senior Research Scientist <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.6>

In modern technologies for producing functional food products, particular attention is paid to studying the thermophysical properties of multicomponent disperse systems containing ingredients of natural origin. One promising object is pumpkin puree, which has high biological value but is also characterized by excessive viscosity, complicating its processing, transportation, and drying. Solving this technological problem requires a scientifically grounded approach to modifying the structural and mechanical properties of the system by introducing functional carbohydrate additives with different rheological effects.

Objective of the study. The aim of this work is to investigate the influence of various carbohydrate components—maltodextrin, sucrose, and corn starch—on the rheological properties of pumpkin puree-based compositions, with the subsequent use of the obtained data to optimize heat and mass transfer processes during spray drying.

Methods. Three formulations of multicomponent pumpkin puree-based compositions with different ratios of carbohydrate components were developed. The samples were prepared by mixing and hydromechanical dispersion using a discrete-pulse energy input method. Rheological

characteristics were studied using a Brookfield rotational viscometer over a temperature range of 20–60 °C at various angular shear rates (from 0.21 to 10.5 s⁻¹).

Results. All compositions exhibited non-Newtonian pseudoplastic behavior with a characteristic dependence of dynamic viscosity on temperature and angular velocity. The addition of different types of carbohydrates significantly affected viscosity: sucrose reduced the effective viscosity of the system by weakening intermolecular interactions between the polymer structures of pumpkin puree, while corn starch enhanced the structural integrity of the composition, increasing shear resistance. Maltodextrin showed a moderate effect, providing an optimal balance between viscosity and flowability. Increasing the temperature generally reduced viscosity in all samples due to the thermal disruption of intermolecular bonds in the water–polymer medium.

Conclusions. The study demonstrated that the rheological properties of multicomponent pumpkin puree-based compositions can be regulated by varying the qualitative and quantitative composition of carbohydrate additives. The obtained results have practical significance for improving heat and mass transfer regimes during drying, enhancing the stability of disperse systems, preserving biologically active components, and achieving desired structural and mechanical properties of the final product. They can be applied in the development of powdered functional food concentrates, particularly in the areas of sports and dietary products.

References 18, tables 1, figures 3.

Key words: pumpkin puree, rheology, maltodextrin, starch, sucrose, multicomponent system.

1. Bai L., Liu F., Xu X., Huan S., Gu J., McClements D.J. Impact of polysaccharide molecular characteristics on viscosity enhancement and depletion flocculation. *Journal of Food Engineering*. 2017. Vol. 207. P. 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.021>.

2. Turk-Gul A., Urgan-Ozturk M., Koca N. The effects of different amounts of maltodextrin on the rheological behaviour and stability of white cheese emulsions, and the physical, microstructural, chemical and sensory properties of white cheese powders. *International Dairy Journal*. 2023. Vol. 138. Article 105552. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105552>.

3. Shao P., Feng J., Sun P., Xiang N., Lu B., Qiu D. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides. *Food Research International*. 2020. Vol. 137. Article 109376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109376>

4. *Chronakis I. S.* On the molecular characteristics, compositional properties, and structural-functional mechanisms of maltodextrins: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1998. Vol. 38. P. 599–637.
5. *Millinia, B.L.; Mashithah, D.; Nawatila, R.; Kartini, K.* Microencapsulation of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Anthocyanins: Effects of Maltodextrin and Trehalose Matrix on Selected Physicochemical Properties and Antioxidant Activities of Spray-Dried Powder. *Future Foods* 2024, 9, 100300
6. *Sia Y. J., Chua L. S., Nor N. F. A., Soo J., Sari E.* Spray drying and characterisation of anthocyanin rich microcapsules from jaboticaba juice with maltodextrin // *Food Bioscience*. – 2025. – Vol. 68. – Article 106446. – ISSN 2212-4292. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106446>.
7. *Turchyna, T., Avdieieva, L., & Makarenko, A.* Prospects and impacts of innovative technology for processing natural fruit raw materials into powder form // *Selected Papers of EDSD of the VI International Conference "European dimensions of sustainable development"* (May 15–17, 2024, Kyiv). – 2024.
8. *Valencia G.A., Zare E.N., Makvandi P., Gutiérrez T.J.* Self-Assembled Carbohydrate Polymers for Food Applications: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019. Vol. 18. P. 2009–2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12499>
9. *Kyrogrou, S., Ritzoulis, C., Theocharidou, A., & Varelziz, P.* Physicochemical Factors Affecting the Rheology and Stability of Peach Puree Dispersions. *ChemEngineering*, V8, №6, 2024. 119. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8060119>
10. *Xie Dongdong, Lei Yanan, Li Xing,* Effect of sucrose levels on dynamic rheology properties of dough during fermentation process, *International Journal of Food Science and Technology*, Volume 58, Issue 3, March 2023, Pages 1326–1335, <https://doi.org/10.1111/ijfs.16291>
11. *Dominguez-Ayala, J. E., Méndez-Montevalvo, G., Cabrera-Ramírez, A. H., Osorio-Díaz, P., Morales-Sánchez, E., & Velázquez, G.* Rheological, functional properties, and stability of peach puree added with normal and high amylose retrograded starches. *CyTA - Journal of Food*, V 22 №1. 2024 <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2333900>
12. *Avdiieva L. Yu., Makarenko A. A.* Doslidzhennia dynamichnoi viazkosti harbuzovoho piure, zvazhaiuchy na vplyv hidromekhanichnykh i temperaturnykh faktoriv [Study of dynamic viscosity of pumpkin puree considering the influence of hydromechanical and temperature factors]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii* [Scientific Works of the National University of Food Technologies]. 2024. Vol. 30, No. 3. P. 189–198. DOI: [10.24263/2225-2924-2024-30-3-17](https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-17). (in ukr.)
13. *Chronakis I. S., Kasapis S., Richardson R. K.* Small deformation rheological properties of maltodextrin-milk protein systems. *Carbohydrate Polymers*. 1996. Vol. 29, No. 2. P. 137–148. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(96\)00014-8](https://doi.org/10.1016/0144-8617(96)00014-8).
14. *Dickinson E., Merino L. M.* Effect of sugars on the rheological properties of acid caseinate-stabilized emulsion gels. *Food Hydrocolloids*. 2002. Vol. 16, No. 4. P. 321–331. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00105-9](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00105-9).
15. *Parvar B., Razavi S. M. A.* Rheological interactions of selected hydrocolloid–sugar–milk–emulsifier systems. *International Journal of Food Science & Technology*. 2012. Vol. 47, P. 854–860. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02918.x>.
16. *Ahmad F. B., Williams P. A.* Effect of sugars on the thermal and rheological properties of sago starch. *Biopolymers*. 1999. Vol. 50, No. 4. P. 401–412.
17. *Erich von Borries-Medrano E., Jaime-Fonseca M. R., Aguilar-Méndez M. Á.* Starch-galactomannans mixtures: Rheological and viscosity behavior in aqueous systems for food modeling. Y Zhenbo Xu (ed.), *Solubility of Polysaccharides*. Rijeka: IntechOpen, 2017. P. 5. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68915>.
18. *Sadeghi F., Kadkhodae R., Emadzadeh B., Nishinari K.* Effect of sucrose on phase and flow behavior of protein-polysaccharide mixtures. *Food Hydrocolloids*. 2021. Vol. 113. Article 106455. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106455>.

Отримано 25.09.2025

Received 25.09.2025

Прийнято до друку 04.11.2025
Accepted for publication 04.11.2025