

Розроблення математичних моделей для прогнозування реологічних характеристик морозива з нетрадиційними рецептурними компонентами



Поліщук Г.С., к.т.н., доцент,
Національний університет
харчових технологій



Вовкодав Н.І., к.ф.-м.н., доцент,
Національний університет
харчових технологій



Рибак О.М., аспірант,
Національний університет
харчових технологій



Бреус Н.М., асистент,
Національний університет
харчових технологій

Використання методів фізико-хімічної механіки дозволяє отримувати готові продукти постійної, заздалегідь заданої якості, інтенсифікувати технологічні процеси, створювати нові продукти. Об'єктами інженерної фізико-хімічної механіки є дисперсні системи, що складаються з двох і більше фаз. Дисперсійним середовищем є безперервна фаза, а дисперсною фазою - фаза, частинки якої не контактують одна з одною. З позицій фізико-хімічної механіки морозиво на різних стадіях технологічного процесу відрізняється за якісним і кількісним складом дисперсної фази і дисперсійного середовища [1-3]. Структурно-механічні властивості характеризують поведінку продукту в умовах напруженого стану і дозволяють зв'язати між собою напруги деформації або швидкості деформацій в процесі збільшення зусиль. Структурно-механічні властивості залежать від форми і розмірів тіла, стану поверхні, його температури, типу структури, швидкості навантаження і ряду інших чинників.

У охолодженій суміші морозива відношення дисперсійного середовища до дисперсної фази складає в середньому 9:1, в загартованому морозиві - близько 1:9 [4]. Наявність і масова частка дисперсійного середовища в продукті харак-

теризує коагуляційний тип структури. Подібні структура грюються у дисперсних системах при взаємодії між часами і молекулами крізь прошарки дисперсійного середовища за рахунок сил Ван-дер-Ваальса. Ступінь взаємодії затем від товщини прошарку дисперсійного середовища. В гренні коагуляційних структур в морозиві суттєву роль виють поверхнево-активні речовини (емульгатори й білку білізатори. Тому утворення структури в морозиві і технсп: ний процес, а також його хімічний склад, взаємозв'язка->

Окрім коагуляційних структур в морозиві утвооюся конденсаційно-кристалізаційна структура за за-з'єднання частинок дисперсної фази. У морозив; водбіється зрощення кристалів льоду, утворення безгєїної структури із флокульованих жирових частино лцеси при зберіганні морозива не постійні часі з різною швидкістю. Визначення станл кондансаш кристалізаційної структури в морозиві за догстзптлогічних характеристик дозволяє управляти ноіесашробництва і зберігання морозива [5. 6].

Для створення нових видів морозива із за»мм№< і тивостями необхідно в першу чергу мати 5анк щ м т н

Таблиця 1

В'язкість розчинів борошна в залежності від теплового оброблення та кількості внесеного зернового компоненту

ВІСЬЯНЕ БОРОШНО												
Т, °С	Кількість вісяного борошна в розчині, %											
	5		15		25		35		45			
	Л ₀ , Па·с	Л _м , Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ , Па·с	Л _м ' Па·с		
20	0,0075	Ньютонів-	0,0830		1,7515	0,1606	3,0849	0,1867	4,2528	0,1018		
40	0,3142	ські рідини	1,3156	0,1780	10,8256	0,1760	18,568	0,9670	Система втрачає текучість			
60	2,3789	0,2741	3,4798	0,1497	14,9721	0,1931						
80	4,2378	0,1827	5,7664	0,1397								
100	10,2756	0,1290	11,3346	0,5320								
ГРЕЧАНЕ БОРОШНО												
Т, °С	Кількість гречаного борошна в розчині, %											
	5		10		15		20		25			
	Л ₀ Па·с	Л _м Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с		
20	0,0352	Ньютонів-	0,4013	Ньютонів-	0,9732	0,0185	2,3817	0,0517	34,7278	3,2155		
40	0,2270	ська рідина	0,9111	ська рідина	0,0146	0,0248	8,4976	0,4731	Система втрачає текучість			
60	0,8330	0,0246	1,5050	0,0274	1,8287	0,0163	10,3449	0,8880				
80	0,9412	0,0295	1,6268	0,0488	2,2388	0,0756	26,9008	3,3267				
100	2,6494	0,0408	3,8376	0,2640	39,5428	1,3420						
ПШЕНИЧНЕ БОРОШНО												
Т, °С	Кількість пшеничного борошна в розчині, %											
	10		20		30		40		50			
	Л ₀ ' Па·с	Л _м , Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м , Па·с	Л ₀ , Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м , Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с		
20	0,0115	Ньютонів-	0,0200	Ньютонів-	0,3719	0,1380	3,7788	0,1820	45,1179	0,8649		
40	0,3701	ська рідина	0,7023	ська рідина	1,5828	0,2118	4,3174	0,3267	Система втрачає текучість			
60	1,4761	0,3049	2,3278	0,0988	38,2977	0,0629						
80	11,3765	0,6072	73,3474	1,0079								
РИСОВЕ БОРОШНО												
Т, °С	Кількість рисового борошна в розчині, %											
	10		20		30		40					
	Л ₀ ' Па·с	Л _м , Па·с	Л ₀ ' Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ , Па·с	Л _м ' Па·с	Л ₀ , Па·с	Л _м ' Па·с				
20	0,00127	Ньютонів-	0,0021	Ньютонів-	2,6781	0,2343	10,1608	1,3781	Система втрачає текучість			
40	0,1282	ські рідини	1,9122	ська рідина								
60	2,7882	0,2326	11,9765	0,1486								
80	4,6307	0,2628										
100	5,6830	0,3377										

вних фізико-хімічних характеристик (хімічний склад, густина, в'язкість чи реологічні величини сумішей та ін.), що є основою при складанні рецептур морозива. Приготування суміші морозива - це перший етап його виробництва, коли утворюється стійка емульсія, на властивості якої чинять вплив майже всі внесені компоненти. Емульгувальні компоненти адсорбуються на межі розділу фаз жир-плазма у вигляді тонких адсорбційних оболонок, що знижує міжфазний поверхневий натяг та запобігає коалесценції часточок жиру після гомогенізації сумішей. Стабілізатори - харчові біополімери, що з хімічної точки зору являють собою гідрофільні колоїди полісахаридної або білкової природи, зв'язують значну кількість вільної вологи та перешкоджають тим самим утворенню великих кристалів льоду, сприяють стійкості структури готового продукту при зберіганні.

На основі проведених попередніх досліджень нами запропоновано використання борошна різних зернових культур (вівсяного, гречаного, рисового, лляного), як структуроутворюючого та збагачуючого інгредієнту у виробництві морозива [7, 8]. Борошно з насіння рослин не є принципово новим інгредієнтом у виробництві морозива: борошно пшеничне вищого ґатунку здавна застосовували в якості стабілізатора, хоча на сьогодні у сучасних технологіях замість нього використовують спеціальні стабілізатори та стабілізаційні системи, переважно полісахариди. За рахунок використання продуктів зернових культур у раціоні харчування людини поповнюється до 40% потреби у білках, до 60% у вуглеводах, до 30% в мінеральних речовинах, до 40% у вітамінах групи В і до 50% енергетичної потреби людини.

) З метою вивчення залежності в'язкості розчинів різних видів борошна від температури гідратації та концентрації внесеного компоненту було проведено серію експериментальних досліджень. Зразки модельних систем із різним кількісним вмістом борошна готували за температурних режимів гідратації: 20, 40, 60, 80 та 100°C. Оскільки кожний вид борошна відрізняється за водопоглинальною здатністю, максимальна доза внесення кожного зернового компоненту була різною. Кількість борошна у зразку обмежувалася втратою текучості системи. На основі даних, отриманих за допомогою ротаційного візкозиметра «Реотест 2», побудовані графіки реологічних кривих та обчислено в'язкості модельних систем на етапі практично незруйнованої ($\tau_{0,0}$, Па·с) та гранично зруйнованої ($\tau_{0,1}$ Па·с) структури (табл. 1).

Отримані результати було опрацьовано за допомогою математичного пакету MathCAD з метою отримання математичних моделей процесу руйнування структури модельних зразків у систему суміжних циліндрів ротаційного візкозиметру, тобто зміни в'язкості досліджуваної системи. Для структурованих рідин характерними є значення в'язкості: практично незруйнованої структури ($\tau_{0,0}$), гранично зруйнованої структури ($\tau_{0,1}$) та ефективної в'язкості ($\tau_{\text{еф}}$), діапазон величини якої обмежується двома попередніми. За допомогою даного програмного пакету було візуалізовано залежності зміни значення в'язкості від зміни температури та концентрації зернового компоненту. Для кожного із обраного ряду борошна побудовано площини в'язкості $\tau_{0,0}$ та $\tau_{0,1}$ (рис. 1). Значення ефективної в'язкості $\tau_{\text{еф}}$ знаходиться у області, яка обмежена площинами $\tau_{0,0}$ і $\tau_{0,1}$.

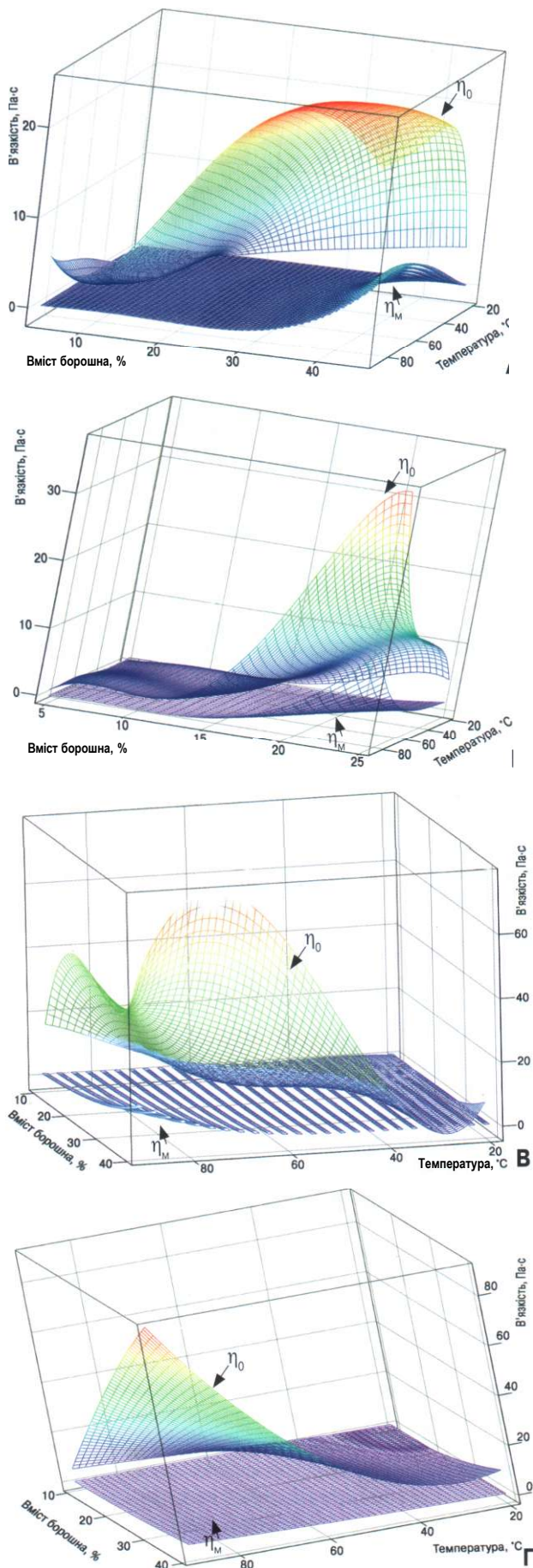


Рис. 1. Математичні моделі зміни в'язкості гідратованих розчинів борошна залежно від концентрації зернового компоненту та температури: А - вівсяне, Б - гречане, В - пшеничне, Г - рисове

Як видно з рис. 1 площина в'язкості η_m , що є характерною для системи із гранично зруйнованою структурою, має більш плоску форму в порівнянні із площиною η_0 . Форма площини, яка описує залежність в'язкості системи η_0 від температури гідратації та масової частки внесеного борошна, обумовлена типом стуктури модельних зразків. За малої концентрації частинок дисперсної фази утворюються системи, що називаються вільнодисперсними, у них частинки вільно переміщуються по всьому об'єму: між ними майже відсутня взаємодія і текучість у таких системах відбувається так само як у рідинах чи газах [9]. Так, для системи із невеликою концентрацією зернового компоненту та невисокою температурою гідратації характерною є структура ньютонівських рідин з незначними аномаліями в'язкості. Для них відношення напруги зсуву τ_c до градієнту швидкості $\dot{\gamma}$ (дане відношення називають в'язкістю) має лінійний характер:

Саме дана властивість ньютонівських рідин обумовлює форму площини τ_0 у даній області, що є близько наближена до площини η_m . Дану залежність спостерігається в усіх дослідних модельних зразках.

Із аналізу отриманих результатів, з математичного опису процесу руйнування структури розчинів борошна (рис. 1) стає очевидним, що за високих температур гідратації та значних концентраціях борошна в'язкість системи стрімко зростає. У цій області модельні зразки втрачали текучість та перетворювалися із структурованих рідин у в'язкі тіла.

Для практичного використання, в умовах виробництва, важливим є створення математичних моделей саме для дисперсних систем із якими створюються структурованих рідин. Розчини борошна із властивостями ньютонівських рідин та в'язких тіл не є придатними для застосування у виробництві морозива. Оскільки вони або не в змозі забезпечити необхідної в'язкості, або створюють занадто в'язкі суміші морозива.

Усі площини, які зображені на рис. 1 були описані поліномними рівняннями за допомогою вбудованих функцій програмного пакету MathCAD. Вихідним фактором є в'язкість, а вхідними - концентрація борошна (y) у системі та температура гідратації (x). F - функція в'язкості при незруйнованій структурі, Δ - функція в'язкості при гранично зруйнованій структурі

Для борошна вівсяного

$$F = 0,237x + 0,28y - 0,042xy - 0,011x^2 - 0,065y^2 + 0,0094xy^2 - 0,0018x^2y + 0,00054x^3 - 0,00015xy^3$$

$$F_1 = -0,007x - 0,081y - 0,0054xy + 0,0024x^2 + 0,019y^2 - 0,00025xy^2 + 0,00018x^2y - 0,0008y^3$$

Для гречаного борошна:

$$F = 0,832x - 4,765y + 0,096xy + 0,923y^2 - 0,047x^2 - 0,013xy^2 + 0,00033x^2y - 0,00013x^2y^2 + 0,00095x^3 - 0,082y^3 + 0,003y^4$$

$$F = 0,07x + 0,426y - 0,066xy - 0,0005x^2 + 0,035y^2 + 0,0048xy^2 + 0,0013x^2y - 0,0083y^3 + 0,00037y^4$$

Для пшеничного борошна:

$$F = -1,935x - 1,081y + 0,223xy + 0,092x^2 - 0,208y^2 - 0,0095x^2y - 0,002xy^2 - 0,0015x^3 + 0,009y^3 - 0,00034xy^3$$

$$F = -0,0014x + 0,00086y - 0,002xy - 0,0055y^2 + 0,00012xy^2 + 0,00016x^2y + 0,001x^3 + 0,00042y^3$$

Для рисового борошна:

$$F = 0,016 + 0,236x - 0,394y - 0,022xy - 0,005x^2 + 0,031y^2 - 0,00044xy^2 + 0,00072x^2y - 0,0001y^3$$

43