

*О.В. Кочубей-Литвиненко, канд.техн.наук, доцент,
А.І. Маринін, канд.техн.наук, с.н.с.,
Національний університет харчових технологій
О.М. Красуля, д-р.техн.наук, проф.
Московський державний університет технологій
та управління ім. К.Г. Розумовського
(Перший козацький університет)*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ СУХИХ КОЦЕНТРАТІВ ІЗ МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ УЛЬТРАЗВУКОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ

Доведено доцільність застосування ультразвукових технологій для інтенсифікації відновлення сухих концентратів із молочної сироватки, зменшення енерго- і ресурсовитрат. Раціональний час відновлення сухої молочної сироватки оцінювали комплексно за зміною середнього гідродинамічного радіуса частинок відновлених продуктів протягом витримання та за динамікою стабілізації показника активності води.

Ключові слова: відновлення, сухі концентрати із молочної сироватки, розчинність, ультразвук, активність води, розмір частинок.

Доказана целесообразность применения ультразвуковых технологий для интенсификации восстановления сухих концентратов из молочной сыворотки, уменьшения энерго- и ресурсозатрат. Рациональное время восстановления сухой молочной сыворотки оценивали комплексно по изменению среднего гидродинамического радиуса частиц восстановленных продуктов на протяжении выдержки и по динамике стабилизации показателя активности воды.

Ключевые слова: восстановление, сухие концентраты из молочной сыворотки, растворимость, ультразвук, активность воды, размер частиц.

Reasonability of the ultrasound technologies use for intensifying reconstitution of dry concentrates of whey was proved, as well as for reduces in energy and resource consumption. Rational time for reconstitution of dry whey was assessed comprehensively by changes in medium hydrodynamic radius of reconstituted products particles during the time of aging and by the dynamics of water activity index stabilization.

Key words: reconstitution, dry concentrates of whey, dissolving ability, ultrasound, water activity index, the particle size.

Постановка проблеми. Сухі концентрати із молочної сироватки широко використовуються в якості збагачувача в різних галузях харчової промисловості: молочній, м'ясній, хлібопекарській, кондитерській тощо, а також для відгодовування сільськогосподарських тварин. Згідно із діючими нормативними документами індекс розчинності сухої сироватки та білкових концентратів коливається в межах 0,3...3,2 см³ сирого осаду залежно від виду продукту та способу сушіння [1]. Важливим технологічним етапом використання сухих концентратів із молочної сироватки є процес відновлення, оскільки від його повноти та інтенсивності залежать якість, властивості, вихід готового продукту, енерго- та ресурсовитрати.

При виборі способу відновлення слід враховувати, що частинки сухих молочних продуктів, зокрема концентратів із молочної сироватки, містять нерозчинні білки з високою молекулярною масою, що важко гідратуються. Надання належних функціонально-технологічних властивостей відновленому продукту потребує тривалої витримки задля найповнішого набування білків розчиненої суміші. Проте дана технологічна операція не здатна створити на межі розподілу «частинка – розчинник» гідродинамічний прошарок

достатньої товщини та запобігти седиментації отриманої суміші. До того ж суттєвим недоліком традиційного відновлення є значні витрати часу та енергії.

Способи інтенсифікації розчинення сухих продуктів базуються на спрямованому впливі таких факторів [2, 3, 4]:

- температури, підвищення якої призводить до зменшення в'язкості розчину, зростання молекулярної дифузії і, як наслідок, до збільшення швидкості процесу. За традиційного відновлення температура має становити 38...45 °С;
- збільшення поверхні контакту фаз без диспергування (механічне перемішування);
- одночасного збільшення поверхні контакту фаз та швидкості обтікання при подрібненні (гомогенізація та диспергування, використання роторно-пульсаційних, вихрових апаратів, млинів, вплив на систему газом чи плазмою тощо);
- накладання стаціонарних силових полів (відцентрових сил, електромагнітних полів тощо) та коливань (низькочастотних звукових, ультразвукових та імпульсних).

Для підвищення ефективності розчинення використовують механічне диспергування та клапанну гомогенізацію, проте вони не володіють енергією, здатною зруйнувати вуглеводневі зв'язки в воді – розчинникові сухих продуктів, що послаблюють її гідратаційну здатність [5, 6].

Відомий спосіб оброблення суміші в роторно-пульсаційному апараті [7, 8], в якому внаслідок градієнту тисків виникає гідродинамічна кавітація. Оскільки це явище існує і діє на межі кавітаційного порогу, тому воно не здатне привести до збільшення гідратаційної активності води, достатньої для руйнування вуглеводневих зв'язків [5, 6].

Перспективним в даному напрямі є використання ультразвукових технологій і сонохімічної водопідготовки.

Р.Б. Дакуорт у 1975 році довів [9], що вода, яка використовується для відновлення сухого продукту, може наблизитися до стану, за якого вона перебуває в натуральному молоці, коли енергія зв'язку води з білком, що характеризує її міцність, набуває найбільшого значення. Гідратація, як й будь-яка обернена хімічна реакція відповідно до принципу Ле-Шательє-Брауна, проходить інтенсивніше за енергетично сприятливих для неї умов. Згідно з твердженням Р.Б. Дакуорта [9], це відбувається, коли гідратна оболонка білка будується із окремих молекул води, не зв'язаних між собою до початку реакції. Такого стану можна досягти попередньою сонохімічною обробкою води [10 – 12].

Більшість явищ, що виникають під ультразвуковим впливом, були вивчені в пакетному режимі, на малих обсягах модельних систем з використанням лабораторних установок і модулів. Тим не менш, протягом останнього десятиліття, безперервні проточні ультразвукові системи, здатні реалізувати промислові обсяги переробки, стають все більш доступними.

Мета роботи – дослідження ефективності відновлення сухих концентратів з молочної сироватки за ультразвуковою технологією.

Методи досліджень. Відновлення сухих продуктів (сухої підсирної сироватки, сухих сироваткових концентратів) проводили за класичною технологією за температури 38...40 °С з подальшим охолодженням і витриманням 3...4 години та з використанням ультразвукових технологій.

В лабораторних умовах процес ультразвукового відновлення здійснювали за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-А. Модельні суміші готували таким чином. До наважки сухого концентрату із молочної сироватки додавали воду з температурою 20 ± 2 °С та 40 ± 2 °С. Суміш піддавали ультразвуковому обробленню за частоти $(22 \pm 1,65)$ кГц, інтенсивності фактору впливу – 6...8 по відносній шкалі та експозиції – 5 хв.

Для адаптації процесу ультразвукового відновлення до промислових умов залучали реактор кавітаційний ультразвуковий (РКУ) (сертифікат відповідності С–RU–TM05.B.00020 TP 1002178). Спосіб оброблення, що реалізується в РКУ з п'єзокерамічним перетворювачем базується на використанні явища акустичної кавітації, що народжується пружними

гармонійними коливаннями ультразвукового діапазону частоти, що розповсюджуються в рідині джерелом ультразвуку.

Сонохімічне оброблення здійснювали в реакторі РКУ за потужності 45, 60, 80 % від паспортної (1200 Вт) і температури (20 ±2), (40 ±2) та (50 ±2) °С. Робоча частота– 20 кГц.

Завершення процесу відновлення сухих продуктів встановлювали за методикою, запропонованою А.Г. Галстяном [13], що базується на дослідженні динаміки стабілізації показника активності води (Aw) протягом витримування відновленої сировини. Показник Aw вимірювали на приладі HygroLab-2 (Rotronic, Швейцарія) за температури (20 ±2) °С.

Дисперсний аналіз частинок відновленої сировини здійснювали на аналізаторі розмірів частинок Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., Великобританія) з кутом детектування 173°. В якості джерела світла використовували гелій-неоновий лазер He-Ne потужністю 4 мВт та довжиною хвилі 633 нм. Усі дослідження здійснювали за температури (25±0,1) °С з кратністю повторень вимірювань для кожного зразка не менше 5. Детектування і оброблення кореляційних функцій проводили за допомогою програмного забезпечення Zetasizer Software version 6.20.

Індекс розчинності визначали за ГОСТ 30305.4-95, відносну швидкість розчинення сухих молочних концентратів із молочної сироватки – за методикою ВНДІМП [14].

Результати та їх обговорення. Встановлено, що індекс розчинності досліджуваних зразків, відновлених за ультразвуковою технологією, був на 0,2...0,4 см³ менше за відповідні зразки, відновлені традиційним способом, що свідчить про більш повне розчинення сухих речовин (рис. 1).

Відносна швидкість розчинення сухих концентратів із молочної сироватки за ультразвукового впливу зростала до 45 % залежно від потужності оброблення та виду сухого продукту.

Рациональний час відновлення сухих концентратів із молочної сироватки за традиційною та ультразвуковою технологіями запропоновано визначати комплексно на підставі змін середнього гідродинамічного радіусу частинок відновлених продуктів, фіксованих кожні 30 хв витримки, та за динамікою стабілізації показника активності води, що є непрямою характеристикою кількості води, зв'язаної гідрофільними компонентами.

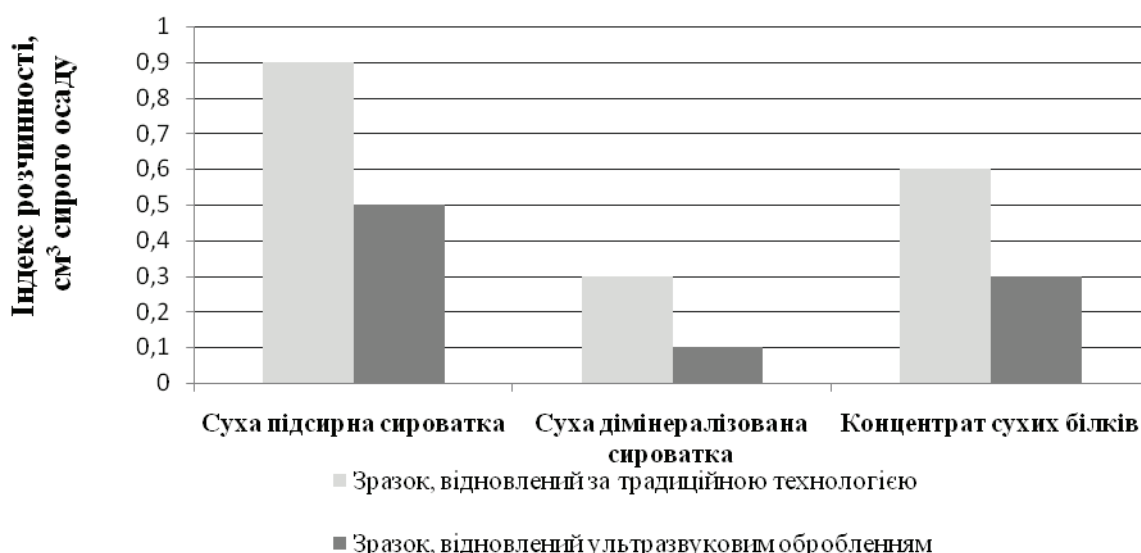


Рис. 1 Індекс розчинності сухих концентратів із молочної сироватки.

Отримані результати підтвердили інтенсифікацію відновлення молочної сировини за ультразвуковою технологією та ірраціональність традиційного витримування (3...4 год.)

відновлених сумішей. Так, в зразках підсирної сироватки, відновлених за допомогою ультразвуку, показник A_w сягав значення, характерного відновленому продукту (0,987...0,990) протягом 30...35 хв, в той час як в зразках, відновлених традиційним способом, стабілізація показника A_w відбувалась протягом 120...150 хв. (рис. 2)

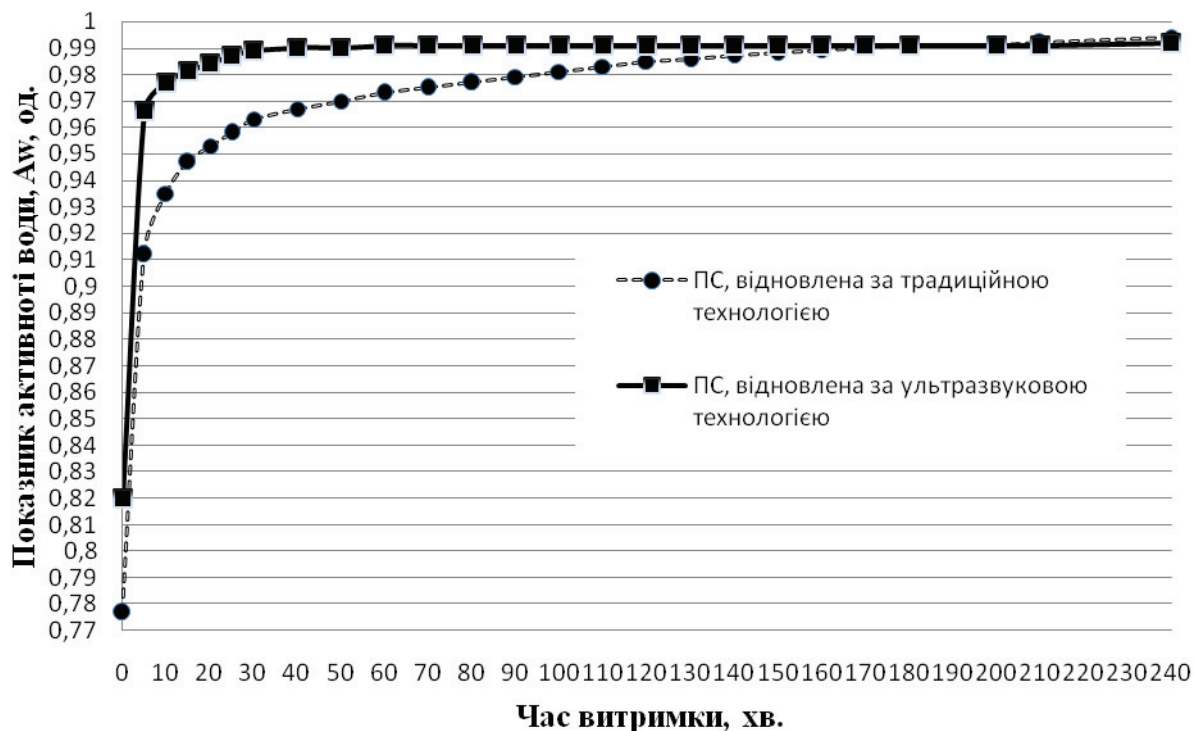


Рис. 2. Динаміка стабілізації показника активності води відновлених зразків підсирної сироватки

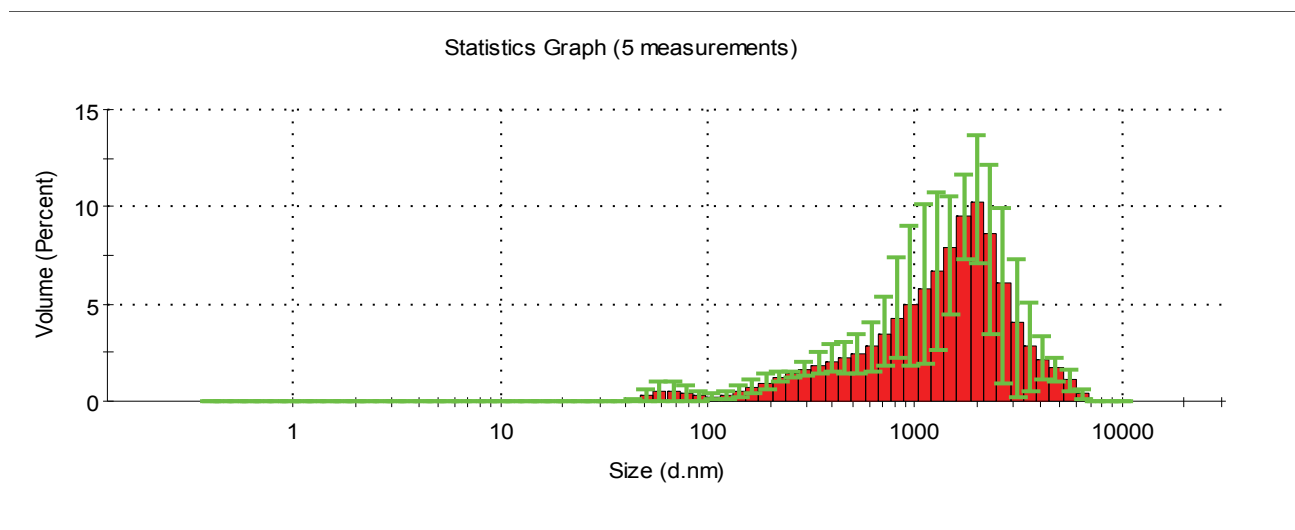
Встановлено, що ультразвукове оброблення відновленої суміші забезпечувало диспергування частинок та отримання системи з середнім гідродинамічним радіусом $463,09 \pm 9,22$ нм (табл. 1), в той час як у зразку, відновленому традиційним способом зазначений показник становив понад 3 мкм. Отже, розчинення сухих концентратів із молочної сироватки за ультразвукового впливу призводило до збільшення поверхні контакту фаз, що, згідно з твердженням Г.А. Аксельруда [2] є одним із чинників інтенсифікації відновлення.

Таблиця 1

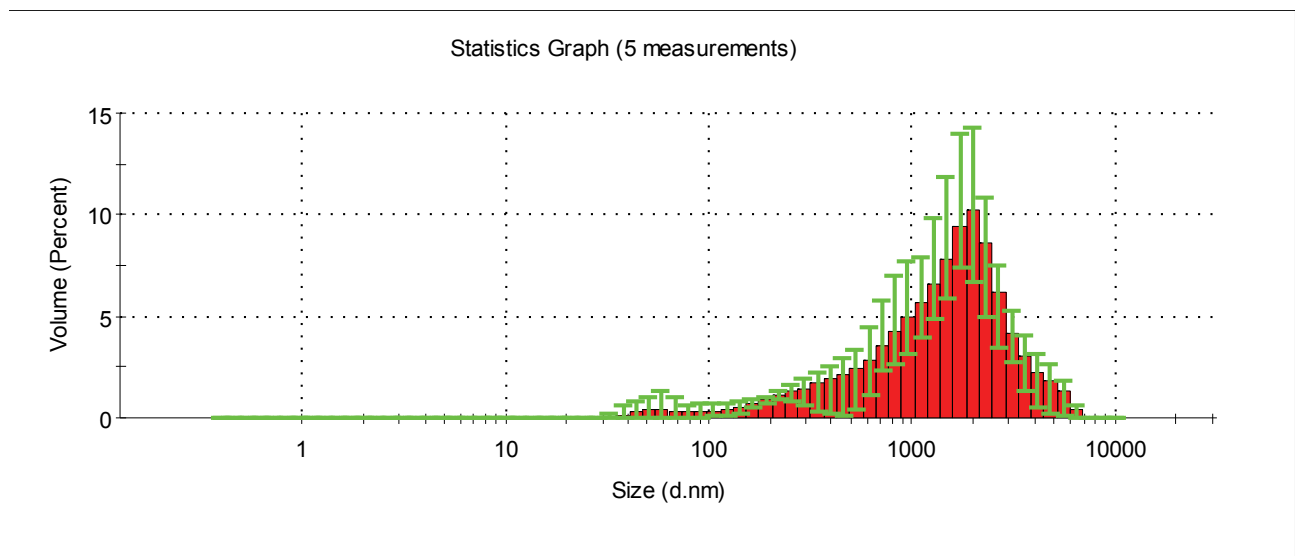
Дисперсний аналіз часток відновлених зразків підсирної сироватки протягом витримування

Зразок	Час витримування, хв.	Середній гідродинамічний радіус, нм	Індекс полідисперсності
Суша підсирна сироватка, відновлена традиційним способом	0	$3031,35 \pm 1687,49$	0,765
	30	$2668,74 \pm 606,51$	0,963
	60	$1301,22 \pm 128,88$	0,993
	90	$834,09 \pm 113,91$	0,906
	120	$757,57 \pm 139,60$	0,843
	150	$554,64 \pm 77,55$	0,836
	180	$278,62 \pm 35,04$	0,667
	210	$251,94 \pm 11,09$	0,582
Суша підсирна сироватка, відновлена ультразвуковим кавітаційним обробленням	0	$463,09 \pm 9,22$	0,483
	30	$472,57 \pm 13,27$	0,516
	60	$467,05 \pm 11,58$	0,511
	90	$462,82 \pm 8,93$	0,499
	120	$471,18 \pm 4,85$	0,484
	150	$468,42 \pm 5,20$	0,526
	180	$458,51 \pm 14,06$	0,525
	210	$473,56 \pm 14,95$	0,503

Відмічено, що після досягнення часу стабілізації показника A_w та протягом витримування середній гідродинамічний радіус частинок продукту, відновленого інноваційним способом, не зазнавав суттєвих змін (табл.1 та рис. 3 а,б). На користь твердження про отримання стабільної за розмірами системи свідчить індекс полідисперсності, який протягом витримування істотно не змінювався й становив 0,483...0,526. Тоді як в зразках, відновлених традиційно, середній гідродинамічний радіус частинок зменшувався поступово протягом 2...3 год. витримування, що вказує на повільне розчинення сухих частинок (рис. 4 а,б, табл. 1). Індекс полідисперсності при цьому майже на усіх позиціях вимірювання був понад 0,8 і лише наприкінці витримування знижувався до 0,582, що скоріше за все свідчить про ймовірне відстоювання великих частинок.

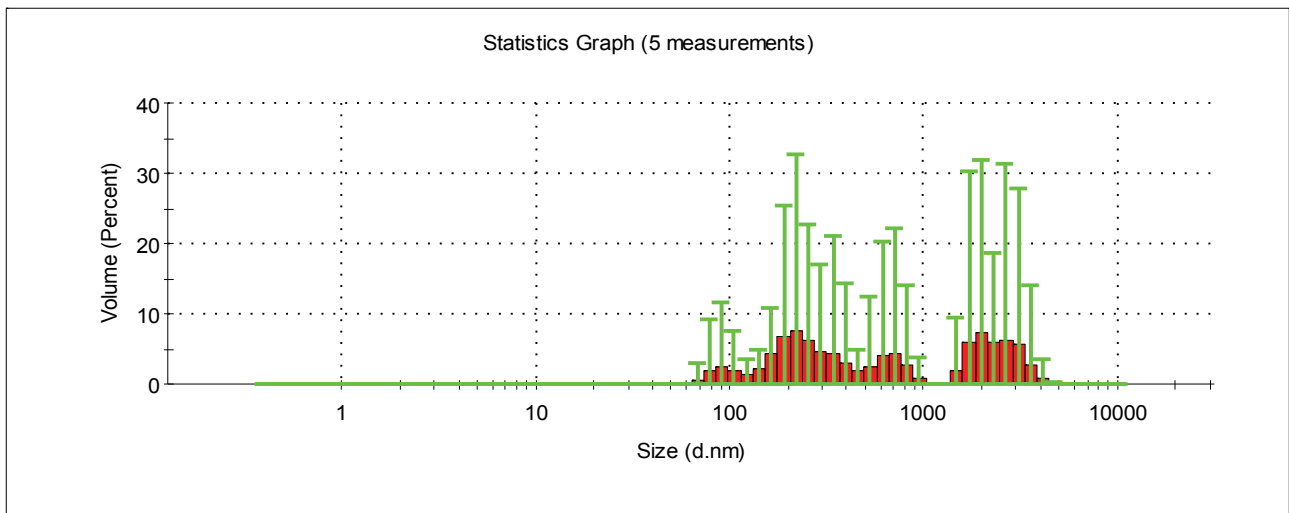


а)

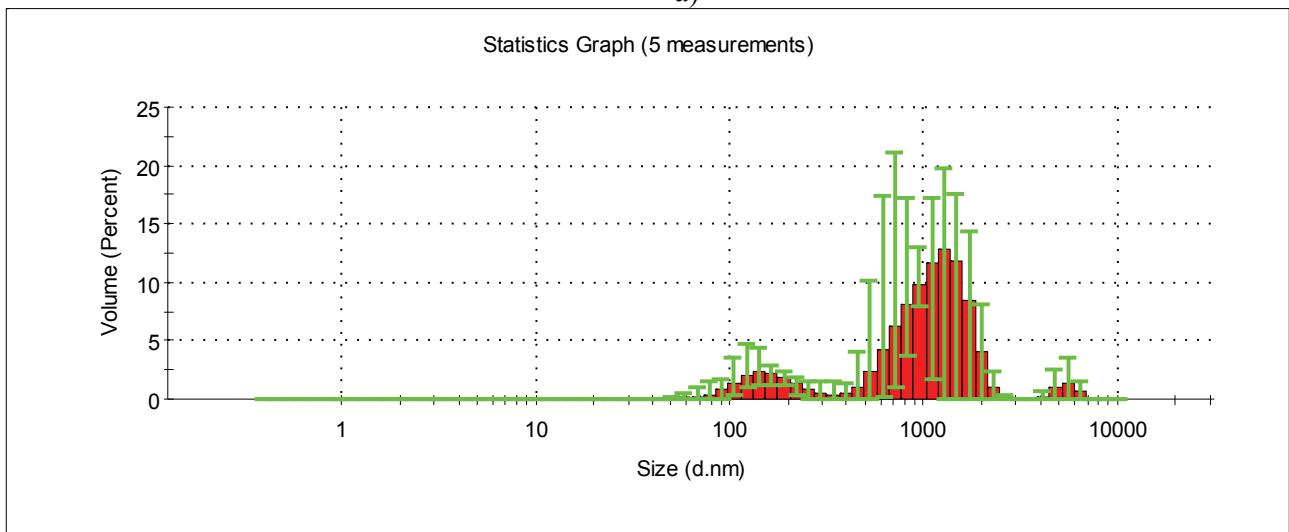


б)

Рис. 3 Об'ємний розподіл за розмірами частинок підсирної сироватки відновленої за ультразвуковою технологією: а) одразу після відновлення, б) через 2,5 години витримування



a)



б)

Рис. 4 Об'ємний розподіл за розмірами частинок підсирної сироватки відновленої традиційним способом: а) одразу після відновлення, б) через 2,5 години витримання

Отримані результати знайшли підтвердження при апробації кавітаційного ультразвукового реактора типу РКУ. Ефективність оброблення знаходилась в прямій залежності до потужності установки та температури оброблення. Зразки, оброблені за потужності 80 % від паспортної потужності РКУ, характеризувалися найкращою розчинністю.

Для візуального підтвердження покращання розчинної здатності води внаслідок ультразвукового оброблення, були приготовлені зразки відновленої сухої підсирної сироватки. Один зразок відновлювали традиційним способом, другий – за ультразвуковою технологією. Рис. 5 свідчить, що оброблення відновлених зразків сухої сироватки в реакторі кавітаційному ультразвуковому ефективно компенсує природну воду, яка була видалена із сироватки під час сушіння.

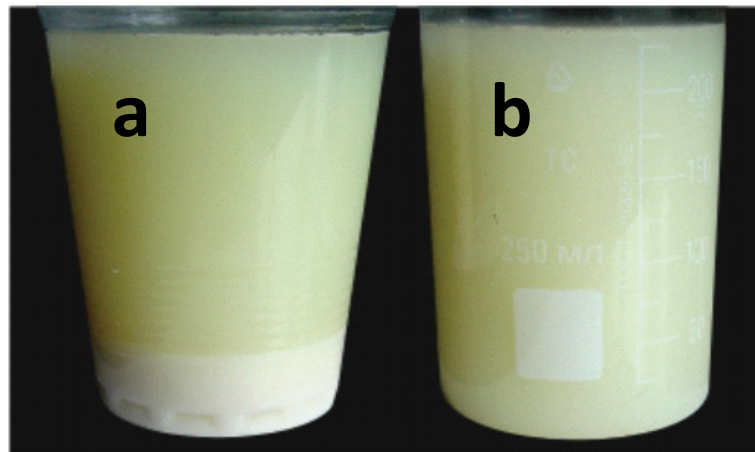


Рис. 5 Розчинність сухої молочної сироватки в звичайній (а) та воді, обробленій на реакторі кавітаційному ультразвуковому (b)

Встановлено, що питомі енерговитрати на відновлення сухих продуктів за сонохімічного впливу були у понад 5 разів меншими за традиційний спосіб і становили відповідно близько 4,7 Вт год/кг та 24,9 Вт год/кг.

Все це забезпечує значний економічний ефект, тому сонохімічна обробка відповідає сучасним тенденціям впровадження енергоощадних технологій, раціонального використання сировини.

Продуктивність установки – 0,36 м³/год, здатна задовольнити промислові потреби підприємств з невеликими обсягами перероблення сировини і може бути рекомендована до впровадження у міні-цехах з виробництва морозива, хлібопекарських та кондитерських цехах, які використовують сухі молочні продукти.

Проведені дослідження дають підстави рекомендувати ультразвукову кавітаційну обробку для відновлення сухих концентратів із молочної сироватки з метою інтенсифікації процесу та зменшення енерго- та ресурсовитрат.

Висновки.

1. Індекс розчинності досліджуваних зразків, відновлених за ультразвуковою технологією, був на 0,2...0,4 см³ менше за відповідні зразки, відновлені традиційним способом, що свідчить про більш повне розчинення сухих речовин.

2. Запропоновано комплексне оцінювання раціонального часу відновлення сухих концентратів із молочної сироватки на підставі змін середнього гідродинамічного радіусу частинок відновлених продуктів протягом витримування та за динамікою стабілізації показника активності води. Підтверджено інтенсифікацію відновлення сухої молочної сировини за ультразвуковою технологією та ірраціональність традиційного витримування (3...4 год.) відновлених сумішей.

3. Виявлено, що в зразках сухої підсирної сироватки, відновлених за допомогою ультразвуку, показник A_w сягав значення, характерного відновленому продукту (0,987...0,990) протягом 30...35 хв, в той час як в зразках, відновлених традиційним способом, стабілізація показника A_w відбувалась протягом 120...150 хв.

4. Встановлено, що ультразвукове оброблення відновленої суміші забезпечувало диспергування частинок, зменшення їх середнього гідродинамічного радіусу, а отже й збільшення поверхні контакту фаз, що є одним із чинників інтенсифікації процесу.

5. В промислових умовах відновлення сухої молочної сироватки та її концентратів рекомендовано проводити в реакторі кавітаційному ультразвуковому за потужності 80 % від паспортної.

Література.

1. Технология продуктов из вторичного молочного сырья: Учебное пособие / А. Храмцов, С. Василисин, С. Рябцева, Т. Воротникова. – СПб.: ГИОРД, 2009. – 424 с.
2. Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д. Растворение твердых веществ. – М.: Химия. – 1977. – 272 с.
3. Швырев, В. Ф. Разработка режимов процесса растворения сухого молока и аппарата для его проведения : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Швырев Владимир Федорович ; Московский институт народного хозяйства им. Г.В. Плеханова.– М., 1984. – 215 с.
4. Семипятный, В.К. Совершенствование технологии восстановления сухих молочных продуктов : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.04 / Семипятный Владислав Константинович ; ГНУ ВНИМИ Россельхозакадемии. – М., 2014. – 124 с.
5. Шестаков, С.Д. Энергетическое состояние воды и ее связываемость биополимерами пищевого сырья: Новые возможности // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2003. – №4. – С. 35-37.
6. Шестаков, С.Д. Управление гидратацией биополимеров пищевых сред // в кн. Теоретические основы пищевых технологий / под ред. акад. В.А. Панфилова. – М: Колос. - 2009. – с. 45
7. Иванец, В.Н. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Г.Е. Иванец // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3. – С. 1-12
8. Тихомирова, Н.А. Гидродинамическая кавитация становится альтернативой ультразвуковой в сонохимических процессах производства молочных продуктов / М. Ашоккумар, О.Н. Красуля, С.Д. Шестаков, В.И. Богуш // Переработка молока. – 2011. - № . – С. 25-30.
9. Water relations of foods / Edited by R.B. Duckworth. – London: Academic Press, 1975 (Вода в пищевых продуктах / Под ред. Р.Б. Дакуорта) – М: Пищевая промышленность, 1980.
10. Ashokkumar, M. The ultrasonic processing of dairy products / M. Ashokkumar, R. Bhaskaracharya, S. Kentish, J. Lee, M. Palmer, B. Zisu // Dairy Science and Technology. – 2010. – Vol. 90. – P. 147-168.
11. Технология и оборудование для обработки пищевых сред с использованием кавитационной дезинтеграции: Учебное пособие для студ. вузов / С.Д. Шестаков, О.Н. Красуля, В.И. Богуш, И.Ю. Потороко – СПб: ГИОРД. – 2013. – 152 с.
12. Артемова, Я.А. Ультразвуковая сонохимическая водоподготовка / Я.А. Артемова, О.Н. Красуля, Н.А. Тихомирова, С.Д. Шестаков // Молочная промышленность. – 2011. – № 5. – с.39-42.
13. Патент 2410682 RU МПК G01N33/04 Способ определения окончания процесса восстановления сухих молочных продуктов / Галстян А.Г., Петров А.Н. ; заявитель ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности». – заявл. 22.12.2006 ; опубл. 27.01.2011
14. Липатов, Н.Н. Сухое молоко / Н.Н. Липатов, В.Д. Харитонов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 264 с.