

Вітенько Т. М., д.т.н., проф., Ворощук В. Я., к.т.н., доц.
ТНТУ ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЕМУЛЬГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ ЗА УМОВИ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМУ

***Анотація.** В роботі наведено результати впливу ефектів дискретно-імпульсного введення енергії в систему на молочний жир. Експериментально обґрунтовано параметри обробки молока у кавітаційному пристрої статичного типу з метою його гомогенізації. Наведено результати досліджень зміни реологічних характеристик сиркової маси (ефективна в'язкість, граничне напруження зсуву, темп руйнування структури) в процесі механічної обробки, що засвідчили інтенсивне руйнування структури маси та її нагрів внаслідок впливу ефектів дискретно-імпульсного введення енергії в систему та визначені коефіцієнти для рівнянь Оствальда-де-Вілля й Гершеля Балклі.*

***Ключові слова:** дискретно-імпульсне введення енергії, кавітація, напруження зсуву, ефективна в'язкість*

Удосконалення найбільш розповсюджених і енергоємних процесів залишається на сьогодні актуальним питанням для харчової промисловості й молокопереробної зокрема. Розвиток енергозберігаючих технологій, що відповідають сучасним вимогам ефективного виробництва та забезпечують оптимальні умови перебігу процесів зазвичай базуються на розробці нових концепцій. Одна з них базується дискретно імпульсному введенні енергії (ДІВЕ) [1, 2].

Серед механізмів ДІВЕ слід відзначити кавітаційний, що забезпечує формування значної кількості парогазових бульбашок та дію зсувних напружень. Цей механізм можливо реалізувати у кавітаційних апаратах статичного чи динамічного типу, роторно-пульсацийних апаратах, ультразвукових. Їх використання у технологіях переробки молока на сьогодні є перспективним і важливим з точки зору впровадження інноваційних технологій у виробництво.

Авторами були проведені дослідження щодо можливості використання кавітаційних та роторно-пульсацийних апаратів для емульгування молочного жиру (гомогенізації молока) та обробки сиркових мас. Об'єктами досліджень були цільне не гомогенізоване молоко і сиркова маса «Ягідка». Реологічні характеристики сиркової маси досліджували на установці «Rheotest 2». Експерименти проводили в три етапи: 1) за умови мінімальної механічної обробки і змінної температури нагріву продукту; 2) за постійної температури і змінної степені механічної обробки; 3) за умови роботи апарату в номінальному режимі.

Як об'єкт досліджень впливу кавітаційних ефектів на молочний жир використовували цільне негомогенізоване молоко із жирністю 4%, з титрованою кислотністю 16 – 20 Т, однорідної консистенції, без осадів і пластівців, без сторонніх присмаків, білого кольору. Для оцінки ефективності гомогенізації використовували метод Гербера. Молоко піддавали багатократній обробці у кавітаційному пристрої статичного типу конструкція якого детально описана в роботі [7] та наведено на рис.1 а.

Дослідження щодо зміни основних реологічних характеристик сиркової маси (ефективна в'язкість, граничне напруження зсуву, темп руйнування структури) в процесі обробки проводили на базі емульсора Я5-ОЕА (рис.1 б).

Експериментальні результати щодо зміни коефіцієнта гомогенізації молока залежно від кількості циклів обробки у статичному кавітаційному пристрої за різних значень температури наведено на рисунках 3а і 3 б. Встановлено, що при 6 циклах обробки найкращий результат гомогенізації 78% отримано для температури 72°C (Рис.2).

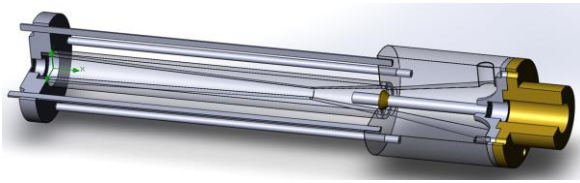


Рис. 1.а - Кавітаційний пристрій статичного типу:
1–активна ділянка обробки; 2 – звужена ділянка;
3– конус



Рис.1.б - Дослідний емульсор.
1 – робоча місткість; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – сорочка; 5 – скребкова мішалка; 6 – циркуляційний трубопровід; 7 – триходовий кран; 8 – кришка, 9а, 9б, 9в – терморпари, 10 – вимірювальний пристрій.

Більшу ефективність обробки при температурі 72°C можна пояснити зниженням в'язкості жирових кульок, розм'ягченням їх ліпідних оболонок, а також тим, що відбувається часткова термодезаерація продукту. Під час досліджень встановлено, що ефективна кратність оброблення молока жирністю 4 % становить 6 (стадія кавітації 2,5...3,0). Причому, ефективність гомогенізації майже однакова для температур 20 °C і 50 °C (відповідно 65% і 70%).

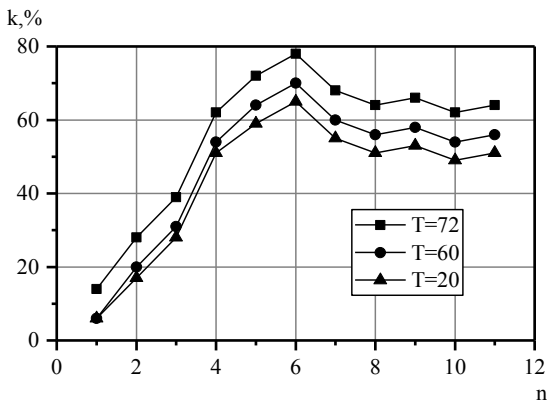


Рис. 2.а - Залежність коефіцієнта гомогенізації молока від кількості циклів обробки за різних значень температури: 1–20°C, 2–50°C, 3–72°C.

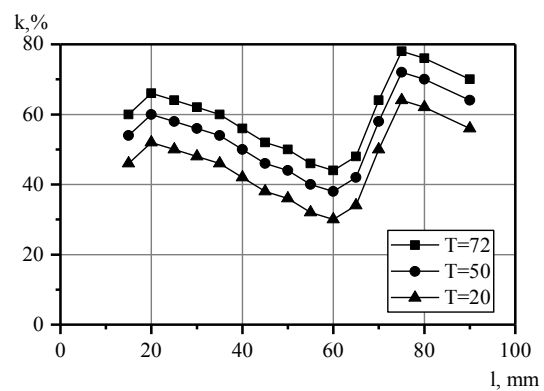


Рис. 2.б -Залежність коефіцієнта гомогенізації молока від відстані між соплом та перешкодою: 1–20°C, 2–50°C, 3–72°C.

Залежність коефіцієнта гомогенізації молока від відстані між звуженою ділянкою та перешкодою при шестикратній обробці в пристрої проточного типу за температури молока 72° C наведено на рисунку 2.б. Спостерігається, що існує раціональна віддаль від сопла до перешкоди, при якій степінь гомогенізації найбільша. Так при відстані до перешкоди 20 мм і шестикратній обробці молока в кавітаційному апараті значення коефіцієнта гомогенізації знаходиться в межах 50% – 70%.

На рис. 3, 4 наведено залежності в'язкості десертної маси від швидкості зсуву для досліджуваного діапазону температур, які засвідчують збільшення швидкості зсуву напруження та зменшення ефективної в'язкості.

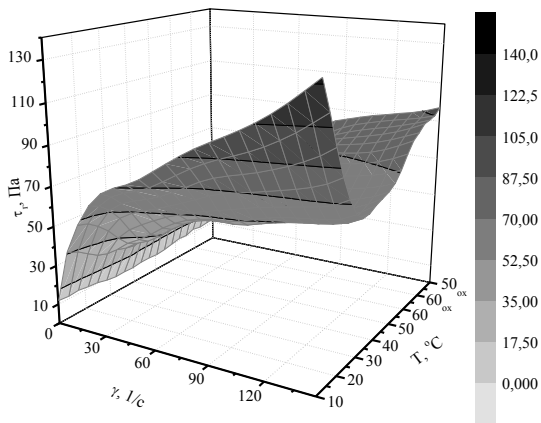


Рис. 3. Залежність напруження зсуву для продукту “Ягідка” від швидкості зсуву і часу в умовах мінімальної механічної обробки.

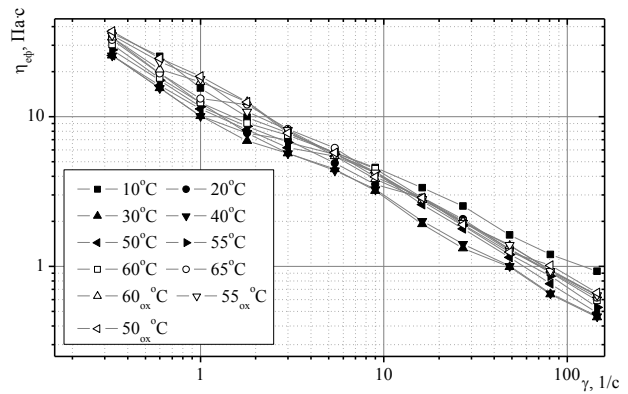


Рис. 4. Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву для продукту “Ягідка” в умовах мінімальної механічної обробки

Із збільшенням температури від 10°C до 30°C в'язкість і напруження зсуву зменшуються, залишаються приблизно постійними в межах температури 30 – 50 °C і за умови збільшення температури зростають. Це пов'язано із структуроутворенням загущувача (пектину), для якого значення температури желеутворення перебуває в межах 52...55°C. Наявність граничного напруження зсуву дозволяє врахувати залежність Гершеля-Балклі.

$$\tau = \tau_o + B \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

де τ_o – граничне напруження зсуву, Па.

Закономірність впливу температури нагріву на ефективну в'язкість зберігається. Значення темпу руйнування структури, які змінюються в незначних межах, свідчить про коректність експерименту. Для незруйнованої структури при 10°C – початку процесу – залежність має такий вид:

$$\tau_r = 9,1 + 11,5 \cdot \dot{\gamma}^{0,475}. \quad (2)$$

При 65 °C (завершенні процесу нагріву), залежність буде мати вигляд:

$$\tau_r = 9,3 + 9,6 \cdot \dot{\gamma}^{0,429}. \quad (3)$$

За умови охолодження до 50 °C:

$$\tau_r = 9,6 + 10,0 \cdot \dot{\gamma}^{0,434} \quad (4)$$

Графічні залежності граничного напруження зсуву і ефективної в'язкості від тривалості механічної обробки при температурі 10°C представлені на рисунках 5, 6.

При відсутності механічної обробки із збільшенням швидкості кутової деформації зростає граничне напруження зсуву. Водночас з перших циклів обробки спостерігається руйнування структури. В подальшому граничне напруження зсуву, а також інші реологічні характеристики, залишаються майже постійним. Проте при тривалості обробки сирної маси понад 260 циклах механічної обробки спостерігається збільшення граничного напруження зсуву і дещо зростає ефективна в'язкість.

Реологічне рівняння Оствальда-де-Вілля для маси на початку процесу має вигляд:

$$\tau_r = 12,5 \cdot \dot{\gamma}^{0,472}; \quad (4)$$

Реологічні рівняння завершення процесу у вигляді залежності Оствальда-де-Вілля

$$\tau_r = 5,1 \cdot \dot{\gamma}^{0,195}; \quad (5)$$

Гершеля Балклі –

$$\tau_r = 5,5 + 1,16 \cdot \dot{\gamma}^{0,370}. \quad (6)$$

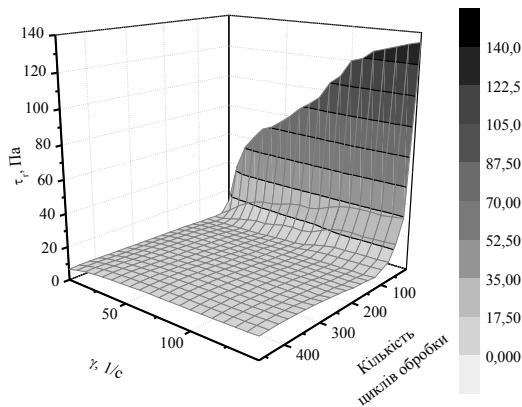


Рис. 5. Залежність напруження зсуву для продукту “Ягідка” від швидкості зсуву в емульсорі при температурі 10°C.

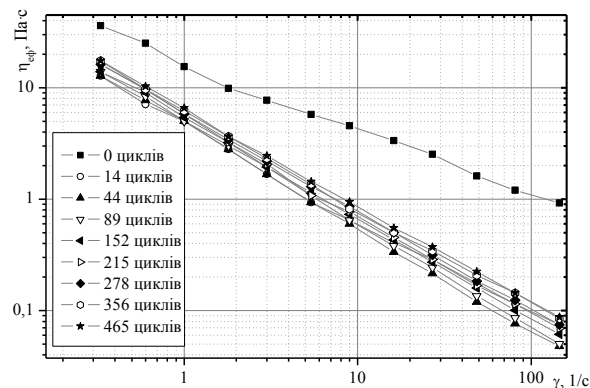


Рис. 6. Залежність ефективної в'язкості для продукту “Ягідка” при обробці в емульсорі при температурі 10°C.

Таким чином, результати досліджень основних реологічних характеристик сиркової маси (ефективна в'язкість, граничне напруження зсуву, темп руйнування структури) в процесі обробки показали, що руйнування структури маси проходить протягом перших 20 циклів циркулювання продукту, а нагрів маси проходить при цілковито зруйнованій структурі.

Під час досліджень також встановлено, що ефективна кратність оброблення молока жирністю 4 % у трьохступеневому апараті становить 2 рази, причому, ефективність гомогенізації майже однакова при температурі 20 °C і 50 °C і стадії кавітації 2,5...3,5 (відповідно 80% і 86%).

В даному випадку це пояснюється зниженням в'язкості жирових частинок, розм'якшенням їх ліпідних оболонок і плавленням навіть найбільш тугоплавких фракцій молочного жиру. При цьому утворюється система “рідина-рідина”, відбувається часткова термодерація продукту, при якій ефективність гідромеханічного впливу кавітації підвищується.

З другого боку, інтенсивність кавітаційного впливу підвищується при відносно низьких температурах, які забезпечують знижену пружність водяної пари. При цьому, вплив кавітації відбувається в середовищі, яке містить рідину з розподіленими в останній твердими жировими кульками, тобто в системі “рідина-тверде тіло”.

Список використаних джерел

1. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. Национальная Академия наук Украины. Институт технической теплофизики. К., Наукова думка, 2008 г. 382
2. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Київ, НТУУ “КПІ”.
3. Hinze J.O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes // A.I.Ch.E.Journ.– 1955. №3. –P.289-295.
4. Clark N. Drop breakup in a turbulent flow. II.Experiments in a small mixing vessels // Ibid.–1988.–№3.3.683-692.
5. Daniele Crudo, Valentina Bosco, Giuliano Cavaglia, Stefano Mantegna, Luigi Battaglia, Giancarlo Cravotto. Process Intensification in the food industry: hydrodynamic and acoustic cavitation in fresh milk treatment. Process intensification. AgroFOOD Industry Hi Tech. Vol. 25(1). P.55-59.
6. Kentaro Matsumiya, Sanae Horiguchi, Tatsuya Kosugi, Taka-Aki Mutoh, Yuko Nambu, Kimio Nishimura, Yasuki Matsumura. Effects of heat treatment and homogenization on milk fat globules and proteins in whipping creams. Elsevier. April 2017. Food Structure. Volume 12, April 2017, Pages 94-102.
7. Vitenko T. Erosive Impact Of Vapor-Gas Phase On The Working Surface In Hydrodynamic Type Cavitation Mode / T. Vitenko, P. Drozdziel, N. Gorodysky / Diagnostyka. 2016. Vol. 17. №.1, P.3-8.
8. L. W. Phipps . Cavitation and separated flow in a simple homogenizing valve and their influence on the break-up of fat globules in milk. Journal of Dairy Research. Published online: 01 June 2009.