

УЛЬТРАЗВУКОВА ТЕХНОЛОГІЯ В ОБРОБЦІ МОЛОКА

А. Ю. Луппол, О. Ф. Луговський

*Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут ім. І. Сікорського»*

Науковий керівник І. А. Гришко

Молоко є одним з найбільш розповсюджених продуктів у світі, при цьому технологія його обробки досить складна, потребує дорогого обладнання та значних затрат на обробку. Та не дивлячись на всю складність обробки, ми втрачаємо весь вітамін С,

а кальцій і фосфор переходять в нерозчинні сполуки, які не засвоюються організмом людини. Саме цьому постали питання в альтернативних методах обробки молока. Ми зосередились на ультразвуковій обробці молока.

В попередній роботі [9] нами було проведено аналіз теоретичних відомостей про УЗ обробку молока. Також ми представили математичну модель, за якої, задавшись певними параметрами, можливо змоделювати процес гомогенізації та пастеризації молока.

Для проведення розрахунків ми уточнили деякі параметри. Та скористалися вхідними даними, за яких було проведено експерименти в ДП «Старокостянтинівський молочний завод». Основним елементом цього стенду є УЗ кавітатор зображений на (рис. 1). З наступними вхідними параметрами (таблиця).



Рис. 1. Ультразвуковий кавітатор

| Параметр | Значення |
|-----------------------|----------|
| Потужність установки | 400 Вт |
| Тиск | 2 атм |
| Амплітуда | 5 мкм |
| Частота коливань | 22,4 кГц |
| Діаметр активної зони | 60 мм |
| Висота активної зони | 80 мм |

Ці данні заводимо в математичну модель представлену в попередній статті [9]. Виходячи з цього отримуємо значення початкових радіусів (рис. 2). Початкові радіуси обмежуються кривою резонансних радіусів (рис. 3).

Як ми бачимо з рис. 3 та рис. 4, резонансний радіус набагато вище, аніж кавітаційної бульбашки за заданої частоти. Це говорить про те, що за наших умов бульбашки не досягатимуть резонансного значення. Тому ми беремо проміжок значень для R_0 (1).

$$R_0 = [2 \cdot 10^{-5}; 6 \cdot 10^{-5}]. \quad (1)$$

Змодельовавши процес ми отримаємо (рис. 4). З графіку видно, що в середньому пухирець схлопується з енергією $E = 0,001$ Дж. Виходячи з того, що ми знаємо потужність кавітатора, ми можемо сказати яку кількість енергії він передає молоку за секунду. Завдяки цій енергії ми маємо змогу порахувати кількість пухирців, що знаходяться в молоці протягом однієї секунди (2):

$$N = \frac{W}{E} = \frac{400}{0,001} = 400000 \text{ од.} \quad (2)$$

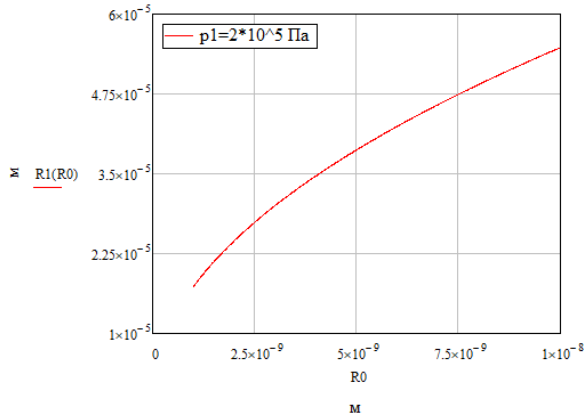


Рис. 2. Розмір початкових радіусів кавітаційних бульбашок розрахований за математичною моделлю

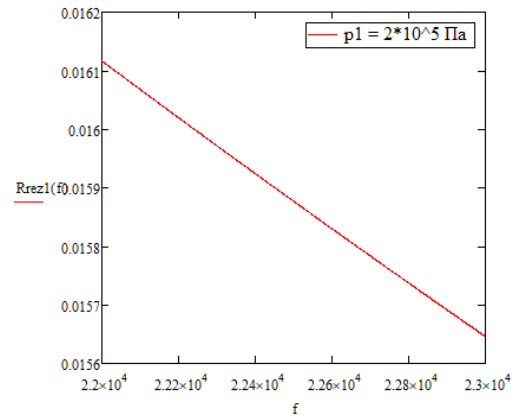


Рис. 3. Максимальні розміри початкових каверн

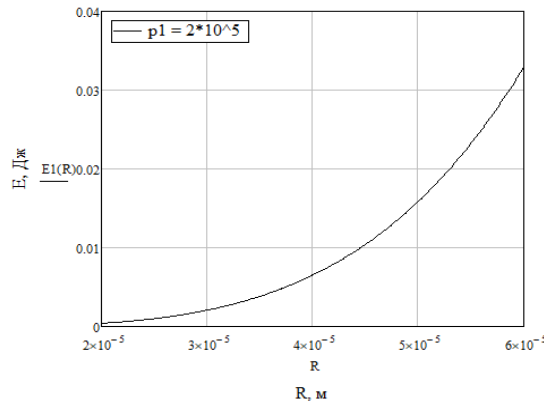


Рис. 4. Енергії схлопування пухирців за вище зазначених умов

Для визначення кількості пухирців, що з'являються у молоці одночасно необхідно визначити час життя пухирця. Для цього необхідно врахувати, що життєвий цикл пухирця становить в середньому 15–25 коливань [7].

Враховуючи, що частота = 22400 Гц, маємо (3):

$$t = \frac{22400}{20} \approx 10^{-4} \text{ с.} \quad (3)$$

Порахуємо кількість пухирців, що схлопуються за 10^{-4} с (4):

$$n = \frac{400000}{10000} \approx 40 \text{ од.} \quad (4)$$

Коли ми маємо кількість пухирців, що схлопуються одночасно, ми можемо сказати який тип схлопування протікає при цьому. Для цього необхідно визначити відстань між пухирцями в об'ємі і якщо ця відстань менша ніж $4R$, то пухирці схлопуються струменевим типом.

Для цих розрахунків прийемо допущення, що пухирці рівномірно розподілені в об'ємі.

$$V = H \cdot \pi R^2 = \pi \cdot 10^{-6} \cdot 72 = 225 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (5)$$

Тоді на один пухирець приходиться $V = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. А це сфера радіусом (6):

$$R = \sqrt[3]{\frac{0,75V}{\pi}} = 1,12 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \quad (6)$$

Як ми бачимо з формули (6), відстань між пухирцями в 100 разів перевищує радіус пухирця. Тому робимо висновок, що пухирці схлопуються поодиноці, розповсюджуючи сферичні хвилі.

Визначимо яка кількість енергії потрапляє в молоко при його обробці за витрати 10 л/хв. За вказаної витрати, об'єм молока проходить через активну зону кавітатора за час t (7):

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{225 \cdot 10^{-6}}{0,17 \cdot 10^{-2}} = 1,3 \text{ с.} \quad (7)$$

З цього випливає, що всього в заданому об'ємі, в молоці проходить близько (8) схлопувань. Та кожне з них протікає розповсюджуючи радіальні хвилі.

$$Nm = 400000 \cdot 1,3 = 520000. \quad (8)$$

Зробимо припущення, що ці пухирці схлопуються одночасно, це дає нам змогу визначити який об'єм приходиться на одне схлопування (9):

$$V = \frac{Vm}{Nm} = \frac{225 \cdot 10^{-6}}{520000} = 4,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2. \quad (9)$$

Як ми бачимо цей об'єм навіть менший за розмір пухирця при схлопуванні. Користуючись відомостями [6], ефективна відстань для ураження становить $4R$, для нас це дорівнює $2 \cdot 10^{-5}$ м. Тому робимо висновок, що ми маємо надлишок пухирців для проведення гомогенізації та пастеризації молока, що гарантує успішність процесу обробки. Для визначення адекватності наведених розрахунків та математичних викладок наведених в попередніх роботах [9] необхідно провести серію експериментів по дослідженню дії ультразвукової кавітації на гомогенізацію та пастеризацію молока. Прогнозування ефективності роботи ультразвукового кавітатора дасть можливість, нам не проводячи натурні досліди визначити необхідні параметри роботи кавітатора, такі як: підведена потужність; інтенсивність введених в рідину ультразвукових коливань; витрата рідини.

Література

1. Хмелев, В. Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев, О. В. Попова // Тр. Алт. гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова. – Барнаул : АлтГТУ, 2004. – 160 с.
2. Скиба, Е. А. Стерилизация молока с помощью ультразвука / Е. А. Скиба, В. Н. Хмелев. – 1962. – Vol. 7. – № 319. – С. 382–385.
3. Рождественский, В. В. Кавитация / В. В. Рождественский. – Л. : Судостроение, 1977. – 247 с.
4. Федоткин, И. М. О возможностях получения избыточной энергии при кавитации / И. М. Федоткин // Вісник ІХФ. – 2009. – № 1 (3).
5. Лавриненко, О. В. Моделирование механо-физикохимических эффектов в процессе схлопывания кавитационных полостей / О. В. Лавриненко, Е. И. Савина, Г. В. Леонов // Ползунов. вестн. – 2007. – 3-е изд.
6. Луговской, А. Ф. Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / А. Ф. Луговской, И. А. Гришко // В кн.: Промислова гідраліка і пневматика. – 2009. – № 4 (26). – С. 3–6.
7. Brenner, Hilgenfeldt, and Lohse. Single-bubble sonoluminescence. Department of Applied Physics and J. M. Burgers Centre for Fluid Dynamics, University of Twente, 7500 AE Enschede, The Netherlands. 2003. – P. 424–472.
8. Перник, А. Д. Проблемы кавитации / А. Д. Перник. – Л. : Судостроение, 1966. – 438 с.
9. Ультразвукова технологія в обробці молока / А. Ю. Луппол [та інш.] // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці : матеріали ХХІІ міжнар. наук.-техн. конф. – 2017. – С. 88–91.