

## ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ПІД ЧАС ОТРИМАННЯ ВОДНО-ЖИРОВИХ ЕМУЛЬСІЙ

*У статті розглянуто проблему визначення раціональної тривалості ультразвукового оброблення водно-жирових сумішей у контексті особливості впливу ультразвуку на систему «вода-жир» із метою визначення ефективних параметрів процесу отримання емульсій.*

**Ключові слова:** *емульсія, частота ультразвукових коливань, тривалість ультразвукового оброблення, процес ультразвукового оброблення, ультразвукова установка, водно-жирова емульсія.*

**Постановка проблеми та її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями.** Емульсії знаходять широкого застосування в багатьох галузях харчової промисловості. Одним із головних складових частин їх є жир.

Для отримання якісних емульсій використовують апарати різних типів. Серед них найпоширеніші: змішувальні, циркуляційні, відцентрові, колоїдні млини та емульсори. Кожен із них має свої переваги та недоліки, обумовлені закладеними в конструкцію механізмами отримання емульсії.

На сьогодні перспективним є використання ультразвукової енергії для отримання емульсій.

Теоретичною проблемою, яка обумовила це дослідження, є складність визначення раціональної тривалості ультразвукового оброблення водно-жирової емульсії.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблемами емульгування в полі ультразвуку в різний час займалися багато вчених: Г. Чампбел, С. Лонг, В. Фридман, Л. Бреховських, Л. Соколов, Ю. Заяс.

Дані про вплив тривалості ультразвукового оброблення на його здатність емульгувати є суперечливими.

Було виявлено [1] два протилежних ефекти за застосування ультразвуку для емульгування:

1. Ультразвук може збільшити швидкість руху часток у рідині, що викликає зростання числа й енергії зіткнень часток;
2. Ультразвук викликає розрив рідини на маленькі частки, що сприяє емульгуванню.

Чампбел і Лонг [2] встановили, що зменшення ступеня емульгування зі збільшенням тривалості оброблення є наслідком надмірного нагрівання рідини. За емульгування рослинних жирів [1] на частоті 22 кГц середній діаметр жирових кульок дорівнює 1,2...1,6 мкм, причому цей діаметр трохи зменшується зі збільшенням тривалості емульгування від 2,5 до 30 хв.

У процесі оброблення ультразвуком поряд із диспергуванням може відбуватися й коалесценція. За постійної частоти та інтенсивності ефект процесу залежить від тривалості оброблення. Тим часом наявні літературні дані є або суперечливими, або такими, що не вказують оптимальної тривалості оброблення.

**Мета та завдання статті** полягає в необхідності визначення раціональної тривалості оброблення водно-жирової суміші з допомогою ультразвуку. У процесі роботи необхідно визначити – від яких факторів залежить тривалість ультразвукового оброблення.

Таким чином, визначення тривалості оброблення дозволить зменшити витрати енергії на проведення процесу емульгування.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Визначення тривалості оброблення водно-жирових сумішей із використанням акустичного випромінювання ультразвукових технологічних установок є невід'ємним і важливим етапом у процесі отримання високоякісних водно-жирових емульсій.

Під впливом ультразвуку в рідині та колоїдних розчинах спостерігається помітне підвищення температури зі швидкістю до декількох градусів за хвилину залежно від властивостей і об'єму середовища, що озвучують. Нагрівання відбувається внаслідок того, що періодичні стискання середовища приводять до адіабатичного підвищення її температури в основному за рахунок перетворення невеликої частини акустичної енергії в теплову за поглинання ультразвуку. Ступінь поглинання обумовлена властивостями середовища та структурою речовини. Найбільше енергії звукових хвиль поглинається в газах, менше – у рідинах і ще менше – у твердих тілах. При цьому поглинання зростає зі збільшенням частоти коливань.

Під час озвучування особливо інтенсивно нагріваються поверхні розподілу двох середовищ, що опромінюються. На межі двох середовищ із різними хвильовими опорами утвориться прикордонний шар. Якщо звукова хвиля падає на межу під кутом, то прикордонні шари роблять додатково тангенціальний зсув відносно один одного. Із цим прикордонним тертям пов'язане сильне локальне нагрівання, що розглядається як вторинний тепловий ефект. Ступінь нагрівання об'єкта, що озвучується, обумовлена інтенсивністю звуку. Поглинання звуку викликане насамперед теплопровідністю середовища і її «внутрішнім» тертям, тобто тертям між частками.

Крім «внутрішнього», є також «зовнішнє» тертя, що виникає внаслідок того, що зсув має скінченну величину. У зв'язку із цим виникає рух часток у граничній поверхні.

Для проведення розрахунків вводимо певні умови. У циліндричній ємності радіусом  $r$  і висотою  $h$  обробляється за допомогою ультразвуку емульсія. Коefіцієнт заповнення ємності дорівнює 1, тобто висота ємності дорівнює висоті стовпа емульсії (товщиною стінок ємності можна знехтувати).

За опромінення всього об'єму середовища у вигляді шару товщиною  $h$  потужність  $P$ , що витрачається на нагрівання середовища, буде становити різницю добутків інтенсивностей на вході до шару і на виході на відповідні значення поперечного перерізу ультразвукового поля:

$$P = I_1 F_1 - I_2 F_2, \quad (1)$$

де  $I_1$  – інтенсивність ультразвуку на вході до шару, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $F_1$  – площа випромінювальної поверхні ультразвукового апарата, м<sup>2</sup>;  
 $I_2$  – інтенсивність ультразвуку на виході із шару, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $F_2$  – площа поперечного перерізу ультразвукового поля, м<sup>2</sup>.

Нехай випромінювальна поверхня ультразвукового устаткування має форму кола з радіусом  $r_{випр}$ , а площа поперечного перерізу ультразвукового поля дорівнює площі поперечного перерізу ємності. Отже, їхні площі відповідно дорівнюють:

$$F_1 = \pi r_{випр}^2, \quad (2)$$

$$F_2 = \pi r^2, \quad (3)$$

Величину інтенсивності ультразвуку на виході із шару можна визначити таким способом:

$$I_2 = I_1 \cdot e^{-2\alpha \cdot h}, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання, м<sup>-1</sup>;  
 $h$  – товщина шару, м.

Ґрунтуючись на тому, що інтенсивність ультразвуку – це потік акустичної енергії, віднесений до одиниці поверхні, перпендикулярної напрямку поширення ультразвуку, або, іншими словами, акустична потужність, що припадає на одиницю поверхні, можемо визначити інтенсивність випромінювання на вході до шару через амплітуду коливань  $A$  торця ультразвукового випромінювача:

$$I_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot \varpi^2 A^2 c_{зв}. \quad (5)$$

де  $\rho$  – щільність суміші, що оброблюється, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\varpi$  – кутова частота, рад/с;  
 $A$  – амплітуда ультразвукових коливань, м;  
 $c_{зв}$  – швидкість звуку, м/с.

Кутову частоту визначають за формулою:

$$\omega = 2\pi f, \quad (6)$$

де  $f$  – частота ультразвукових коливань, Гц.

Сумарний коефіцієнт поглинання  $\alpha$  є сумою коефіцієнтів поглинання, які залежать від в'язкості середовища  $\alpha_1$  і теплопровідності  $\alpha_2$ :

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (7)$$

Поглинання  $\alpha_1$ , обумовлене в'язкістю середовища, розраховують за рівнянням Стокса [3], а поглинання за рахунок теплопровідності  $\alpha_2$  – за рівнянням Кирхгофа [3]:

$$\alpha_1 = \frac{8\pi^2 \cdot f^2 \eta}{3c_{зв.}^3 \cdot \rho} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi^2 \cdot f^2}{c_{зв.}^3 \cdot \rho} \cdot \frac{\gamma - 1}{c_p} \cdot \lambda_m \quad (9)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість середовища, Па·с;  
 $\nu$  – відношення питомих теплоємностей;  
 $c_p$  – теплоємність за постійного тиску, Дж/(кг·К);  
 $\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Тоді, ґрунтуючись на формулах (8) і (9), маємо:

$$2\alpha = \frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{c^3 \cdot \rho_0} \cdot \left( \frac{4}{3}\eta + \frac{\nu - 1}{c_p} \cdot \lambda_m \right). \quad (10)$$

Припустимо, що вся акустична енергія, що поглинається, буде витратитися на нагрівання емульсії. Виходячи із цього, маємо:

$$P \cdot \tau \cdot k = \Delta t \cdot G \cdot c, \quad (11)$$

де  $\tau$  – тривалість ультразвукового оброблення с;  
 $\Delta t$  – підвищення температури внаслідок оброблення суміші, К;  
 $G$  – маса продукту, що оброблюється, кг;  
 $c$  – питома теплоємність продукту, Дж/(кг·К);  
 $k$  – коефіцієнт корисної дії.

Маса продукту, що оброблюється, визначається за відомою формулою :

$$G = V\rho, \quad (12)$$

де  $V$  – об'єм продукту, що оброблюється, м<sup>3</sup>.

Тоді, використовуючи формулу (12), можна визначити тривалість ультразвукового оброблення без обліку теплопровідності таким способом:

$$\tau = \frac{\Delta t \cdot V \cdot \rho \cdot c}{P \cdot k}. \quad (13)$$

Експериментальні дані залежності  $\Delta t(\tau)$  свідчать, що 92% отриманих даних можуть бути апроксимовані лінійною залежністю. Кут нахилу до осі  $\tau$  є громіздкою функцією багатьох параметрів. У межах моделі (11) коефіцієнт поглинання  $\alpha$  можна записати у вигляді:

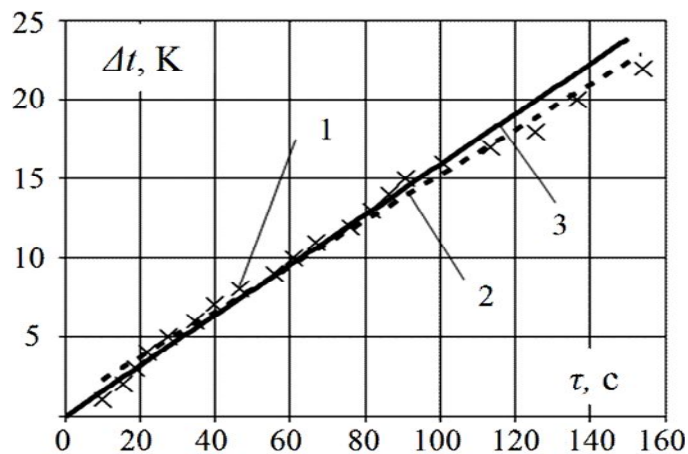
$$\alpha = \arctg \left( \frac{2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot c_{зв.} \cdot k}{r^2 \cdot h \cdot c} \cdot \left( r_{еунр.}^2 - r^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{c_{зв.}^3 \cdot \rho} \cdot \left( \frac{4}{3} \eta + \frac{\nu-1}{c_p} \cdot \lambda_m \right) \cdot h} \right) \right), \quad (14)$$

У разі, якщо показник експонентної функції є малою величиною ( $e^\beta = 1 + \beta$ ), то будемо мати звичайну лінійну функцію, а саме:

$$\Delta t = \frac{2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot c_{зв.} \cdot k \cdot \tau}{r^2 \cdot h \cdot c} \cdot \left( r_{еунр.}^2 - r^2 + \frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta \cdot r^2}{c_{зв.}^3 \cdot \rho} \cdot \left( \frac{4}{3} \eta + \frac{\nu-1}{c_p} \cdot \lambda_m \right) \cdot h \right), \quad (15)$$

Наведена формула (15) показує залежність раціональної тривалості ультразвукового оброблення від наступних чинників: параметрів ультразвукової коливальної системи, геометричних розмірів ємності, характеристики сировини і її кількості.

Результати, що отримали, були підкріплені експериментальними дослідженнями (рисунок 1).



1 – експериментальні значення; 2 – кореляція експериментальних значень; 3 – розрахункова залежність.

Рисунок 1 – Залежність різниці зміни температури водно-жирової емульсії  $\Delta t$  від тривалості ультразвукового оброблення  $\tau$  за частоти ультразвукового оброблення 22 кГц

Виходячи із сучасного аналізу уявлення про процес за літературними джерелами, як визначальну частоту ультразвукових хвиль було обрано значен-

ня 22 кГц. Встановлено, що раціональна тривалість ультразвукового оброблення не повинна перевищувати 160 с. Подальше збільшення тривалості оброблення призводить до різкого збільшення температури емульсії, що отримується, що погіршує її якість.

Таким чином, за допомогою цієї формули можна розрахувати необхідну тривалість ультразвукового оброблення. До того ж, подана формула показує залежність тривалості ультразвукового оброблення від наступних факторів: параметрів ультразвукової коливальної системи, геометричних розмірів ємності, характеристики сировини і його кількості.

Варто зазначити, що значення  $\Delta t$  залежить від виду жирової сировини. Початкова температура суміші повинна бути на 5...10°C вище за температуру плавлення жиру, що входить до її складу. Однак у процесі отримання емульсії значне підвищення температури (до 65°C) призводить до дестабілізації жирів, що погіршує якість емульсії. До того ж, за проведення емульгування важливим критерієм є ступінь дисперсності й стабільності емульсії, які свідчать про ефективність процесу емульгування. Ці показники не знайшли відображення в розрахунках, тому що визначити вплив факторів на них можна тільки експериментальним шляхом.

**Висновки.** Незважаючи на те, що ці обчислення є приблизними, але, ґрунтуючись на них, можна визначати інтервал тривалості ультразвукового оброблення водно-жирової суміші. Цей показник дозволить обґрунтувати енергетичні витрати на виробництво емульсій.

### Список літератури

1. Хмелёв В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: моногр. / В.Н. Хмелёв, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
2. Заяс Ю.Ф. Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности / Ю.Ф. Заяс. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 292 с.
3. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат [и др.]. – М.: Металлургия, 1974. – 460 с.

УДК 664:665

Дробот В.І., д-р техн. наук., проф.,

Грищенко А.М., канд. техн. наук (НУХТ, Київ)

### ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ БОРОШНА КРУП'ЯНИХ КУЛЬТУР У ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ХЛІБА

*У статті розглянуто проблему виробництва безглютенових хлібобулочних виробів для хворих на целиакію. Наведено результати досліджень впливу борошна різних круп'яних культур на структурно-механічні властивості безглютенового тіста.*

**Ключові слова:** безглютеновий хліб, целиакія, безглютенові види борошна, структурно-механічні властивості тіста.