

УДК 641.539:664

## ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВОДНО-ЖИРОВИХ ЕМУЛЬСІЙ

Дейниченко Г.В., д.т.н.,

Постнов Г.М., к.т.н.,

Червоний В.М., к.т.н.,

Старков В.О., студент \*

*Харківський державний університет харчування та торгівлі*

Тел. (057) 349-45-56

**Анотація** – робота присвячена проблемі теоретичного та експериментального визначення раціональної тривалості ультразвукової обробки для отримання високоякісних водно-жирових емульсій.

**Ключові слова** – ультразвук, частота, раціональна тривалість, емульсія, інтенсивність, температура.

*Постановка проблеми.* Емульсії знаходять широке застосування в багатьох галузях харчової промисловості. Однією із головних їх складових частин є жир.

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

На сьогоднішній час, перспективним є використання ультразвукової енергії для отримання емульсій.

Під час виробництва емульсій за допомогою ультразвуку стає можливим додатково вводити в них з жировою або водною фазами вітаміни та інші фізіологічно активні речовини, необхідні для нормального існування й розвитку організму; одержувати емульсії з наперед відомим складом і встановленим співвідношенням компонентів. Доцільно використовувати цю можливість під час готування соусів типу "майонез".

Жирові емульсії, отримані за допомогою ультразвуку, можна використовувати в хлібопекарському та кондитерському виробництвах як компонент продуктів, що виготовляються, так і для змащення пекарських форм. В останньому випадку можна зменшити

---

© Дейниченко Г.В., д.т.н., проф., Постнов Г.М., к.т.н., проф., Червоний В.М., к.т.н., доц., Старков В.О., студ.

\* Науковий керівник – Дейниченко Г.В., д.т.н., проф.

витрати харчових жирів за умови заміни їх на емульсії. Можливе використання жирових емульсій у готуванні ковбасних і м'ясних січених виробів з метою поліпшення якості продукції.

Теоретичною проблемою, яка обумовила дане дослідження, є складність визначення раціональної тривалості ультразвукової обробки водно-жирової емульсії.

*Аналіз останніх досліджень.* Проблемами емульгування в полі ультразвуку в різний час займалися багато вчених, серед яких можна виділити Г. Чампбела, С. Лонга, В.М. Фрідмана, Л.М. Бреховських, О.О. Соколова, Ю.Ф. Заяса тощо.

Дані про вплив тривалості ультразвукової обробки на його здатність емульгувати суперечливі.

Було виявлено [1] два протилежних ефекти при застосуванні 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.

Чампбелл і Лонг [2] встановили, що зменшення ступеня емульгування зі збільшенням тривалості обробки є наслідком надмірного нагрівання рідини. Під час 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.

Під час обробки ультразвуком поряд з диспергуванням може відбуватися й коалесценція. При постійній частоті й інтенсивності ефект процесу залежить від тривалості обробки. Тим часом наявні літературні дані або суперечливі, або не вказують оптимальної тривалості обробки.

*Формулювання цілей статті.* Мета та завдання статті полягає в необхідності визначення раціональної тривалості обробки водно-жирової суміші з допомогою ультразвуку. У процесі роботи необхідно визначити – від яких чинників залежить тривалість ультразвукової обробки. Таким чином, визначення тривалості обробки дозволить зменшити витрати енергії на проведення процесу емульгування.

*Основна частина.* Визначення тривалості обробки водно-жирових сумішей з використанням акустичного випромінювання ультразвукових технологічних установок є невід'ємним і важливим етапом у процесі отримання високоякісних водно-жирових емульсій.

На підставі проведених досліджень [3] можна зробити висновок, що 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 призводять до адіабатичного

підвищення її температури в основному за рахунок перетворення невеликої частини акустичної енергії в теплову під час 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 утворюється прикордонний шар. Якщо звукова хвиля падає на границю 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 біля граничної поверхні.

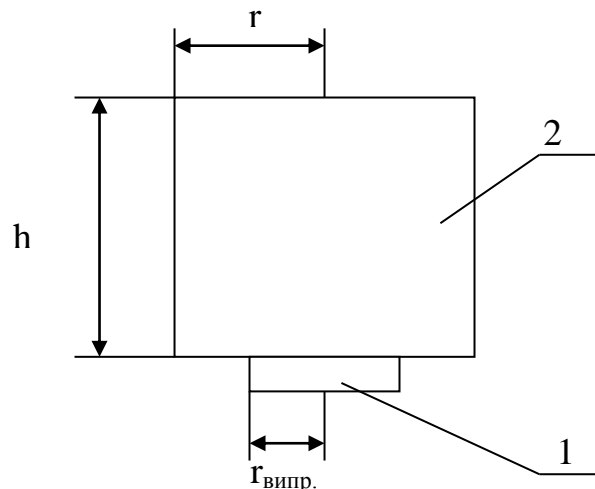


Рис. 1. Схема проведення ультразвукової обробки:  
1 – випромінювач, 2 – ємність з сумішшю, що обробляється.

Таким чином, для виявлення раціональної тривалості ультразвукової обробки необхідно провести розрахунки. Для цього вводимо певні умови. У циліндричній ємності радіусом  $r$  і висотою  $h$  обробляється за допомогою ультразвуку емульсія (рис. 1). Коефіцієнт заповнення ємності дорівнює 1, тобто висота ємності дорівнює висоті стовпа емульсії (товщиною стінок ємності можна знехтувати).

Під час опромінення всього об'єму середовища у вигляді шару товщиною  $h$  потужність  $P$ , витрачена на нагрівання середовища, буде становити різницю добутків інтенсивностей при вході в шар 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 при вході в шар, Вт/м<sup>2</sup>;

$F_1$  – площа випромінюючої 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>.

Припустимо, що випромінююча поверхня ультразвукового устаткування має форму кола з радіусом  $r_{\text{випр.}}$ , а площа поперечного перерізу ультразвукового поля дорівнює площі поперечного перерізу ємності. Отже, їхні площі відповідно дорівнюють

$$F_1 = \pi r_{\text{випр.}}^2, \quad (2)$$

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

Величину інтенсивності ультразвуку на виході із шару можна визначити в такий спосіб.

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

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

Грунтуючись 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 при вході шару через амплітуду коливань  $A$  торця ультразвукового випромінювача

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

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

Кутову частоту визначають за формулою

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

де  $f$  – частота ультразвукових коливань, Гц.

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

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

Поглинання  $\alpha_1$ , обумовлене в'язкістю середовища, розраховують за рівнянням Стокса [4], а поглинання за рахунок теплопровідності  $\alpha_2$  – за рівнянням Кірхгофа [4]:

$$\alpha_1 = \frac{8\pi^2 \cdot f^2 \eta}{3c_{36}^3 \cdot \rho}, \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi^2 \cdot f^2}{c_{36}^3 \cdot \rho} \cdot \frac{\gamma - 1}{c_p} \cdot \lambda_m, \quad (9)$$

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) отримаємо

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

Припустимо, що вся акустична енергія яка поглинається буде витрачатися на нагрівання емульсії. Виходячи із цього, матимемо

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

де  $\tau$  – тривалість ультразвукової обробки, с;  $\Delta t$  – підвищення температури в наслідок обробки суміші, К;  $G$  – маса продукту що обробляється, кг;  $c$  – питома теплоємність продукту, Дж/(кг·К).

Маса оброблюваного продукту визначається за відомою формулою

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

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

Тоді, використовуючи формулу (12), можна визначити тривалість ультразвукової обробки без обліку теплопровідності в такий спосіб

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

Ґрунтуючись на формулах (1)...(13), отримуємо

$$\tau = \frac{\Delta t \cdot r^2 \cdot h \cdot c}{2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot c_{36} \cdot \left( r_{узн.}^2 - r^2 \cdot e^{-\frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{c^3 \cdot \rho_0} \left( \frac{4}{3} \eta + \frac{\nu - 1}{c_p} \lambda_m \right) h} \right)}. \quad (14)$$

Варто відзначити, що значення  $\Delta t$  залежить від виду жирової сировини. Початкова температура суміші повинна бути на  $5...10^\circ\text{C}$  вище температури плавлення жиру, що входить до її складу. Проте в процесі отримання емульсії значне підвищення температури (до  $65^\circ\text{C}$ ) приводить до дестабілізації жирів, що погіршує якість емульсії. До того ж, при проведенні емульгування важливим критерієм є ступінь дисперсності й стабільності емульсії, за якими судять про ефективність процесу емульгування. Ці показники не знайшли відображення в розрахунках, тому що визначити вплив чинників на них можна лише експериментальним шляхом.

У процесі проведення експерименту було, зроблено наступне. Жирова сировина, що мала температуру  $25^\circ\text{C}$ , була змішана з водою, температура якої складала близько  $80^\circ\text{C}$ . Концентрація жиру в суміші була обрана 30%, що зумовлено даними, які свідчать, що ультразвукове емульгування з цим вмістом жиру може проходити без присутності емульгаторів. Температура отриманої водно-жирової суміші колоїдно-емульсійного типу склала близько  $40^\circ\text{C}$ . Озвучування водно-жирової суміші без додавання емульгаторів і стабілізаторів проводилося при 22 кГц на установці ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т. Діаметр випромінювача дорівнював 15 мм, ємність мала внутрішній діаметр 65 мм, висота стовпчика суміші дорівнює 100 мм.

Графік залежності зміни температури від тривалості обробки ультразвуком представлений на рис. 2. Виміри температури проводили за допомогою термодатчика, який підключили до ЕОМ через USB-з'єднання і програми віртуального термометра VT-48.

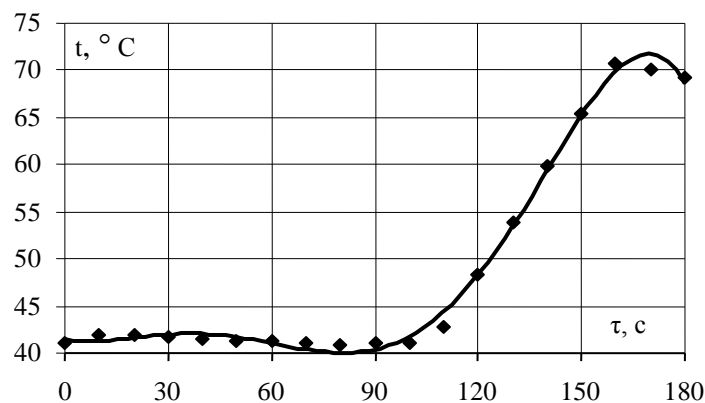


Рис. 2. Графік залежності температури водно-жирової суміші від тривалості ультразвукової обробки.

За результатами теоретичних розрахунків та використовуючи формулу (14), було визначено, що теоретична тривалість ультразвукової обробки складатиме 137 с. За результатами експерименту було виявлено, що отримана емульсія після ультразвукової обробки протягом 90 с має стабільність 68%, протягом 120 с – 82%, протягом 150 с – 93%. Подальше збільшення тривалості

ультразвукової обробки призводило до нагрівання емульсії більше ніж 65...70° С.

*Висновки.* Таким чином, за допомогою запропонованої авторами формули, можна розрахувати раціональну тривалість ультразвукової обробки. До того ж, представлена формула показує залежність тривалості ультразвукової обробки від наступних чинників: параметрів ультразвукової коливальної системи, геометричних розмірів ємності, характеристики сировини і його кількості.

Література:

1. Хмелёв В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве : научная монография / 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. : Пищевая промышленность, 1970. – 292 с.

3. Дейниченко Г.В. Отримання водно-жирових емульсій за допомогою ультразвуку / Г.В. Дейниченко, Г.М. Постнов,

4. М.А. Чеканов, В.М. Червоний та ін. – Х.: Факт, 2013. – 192 с.

5. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология / Б. А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. – М. : Металлургия, 1974. – 460 с.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДНО- ЖИРОВЫХ ЭМУЛЬСИЙ**

Дейниченко Г.В., Постнов Г.М., Червоний В.Н., Старков В.А.

**Аннотация - работа посвящена проблеме теоретического и экспериментального определения рациональной продолжительности ультразвуковой обработки для получения высококачественных водно-жировых эмульсий.**

## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION RATIONAL DURATION OF ULTRASOUND TREATMENT FOR WATER-FAT EMULSION**

G. Deynichenko, G. Postnov, V. Chervonyi, V. Starkov

### *Summary*

**Research is devoted to theoretical and experimental determination of a rational duration of ultrasonic processing to produce high quality water and fat emulsions.**