

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПІД ЧАС КОНЦЕНТРУВАННЯ В'ЯЗКИХ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ

**Черевко О.І., д.т.н., проф., Потапов В.О., д.т.н., проф.,
Маяк О.А., к.т.н., доц.**

(Харківський державний університет харчування та торгівлі)

Досліджено процес уварювання овочевого пюре під час виробництва пастоподібних концентратів напоїв. У результаті проведених експериментів отримано критеріальне рівняння процесу тепловіддачі, в якому враховано зміни реологічних властивостей продукту, що уварюється.

Постановка завдання. Виробництво продуктів харчування належить до найбільш енергоємних технологічних процесів із підвищеними вимогами до якості кінцевого продукту. У переробних галузях АПК втрачається до 40% сировини, спостерігається тенденція постійного зростання енергетичної складової в собівартості продуктів харчування. Розрахунок устаткування здійснюється за застарілими методиками, які не враховують реологічних характеристик продукту, що переробляється. Воно має підвищену металоємність та зайвий запас потужності, що істотно відбивається на собівартості продукції. З огляду на подібні чинники, гостро постають проблеми створення нового та удосконалення існуючого устаткування, яке сприятиме скороченню енергоспоживання у поєднанні зі збереженням сировинних ресурсів, упровадження сучасних технологій з переробки харчової сировини. Слід зазначити, що одним із перспективних напрямків в удосконаленні процесів переробки як за кордоном, так і в Україні є створення апаратів з активними гідродинамічними характеристиками, в яких досягається значна інтенсифікація процесів тепло - і масообміну.

Аналіз останніх досліджень. У ХДУХТ на кафедрі процесів, апаратів і автоматизації харчових виробництв розроблено технологію виробництва нових високов'язких продуктів – пастоподібних концентратів напоїв (ПКН), в основу одержання яких покладено уварювання овочевого пюре під вакуумом із застосуванням нової скребкової мішалки [1].

По теплообміну в неньютонівських рідинах в апаратах з мішалками за останні роки з'явилася велика кількість публікацій [2-5].

Проте, застосування отриманих авторами критеріальних рівнянь для теплового розрахунку вакуум-апарата з розробленою мішалкою, що використовується під час виробництва ПКН неможливе, через особливості конструкції нової мішалки, а також реологічні властивості сировини, що переробляється.

Метою даної роботи було дослідити процес теплообміну під час уварювання ПКН у вакуум-випарному апараті з мішалкою, одержати узагальнену критеріальну залежність для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі за умов використання нової скребкової мішалки з урахуванням змін реологічних властивостей розробленого продукту.

Результати досліджень. Для визначення критеріального рівняння, що описує процес теплообміну в експериментальному вакуум-випарному апараті з розробленою скребковою мішалкою, використовували метод аналізу розмірностей.

У даному випадку коефіцієнт тепловіддачі α залежить від наступних параметрів, що істотно впливають на процес:

$$\alpha = f(d, \lambda, n, \rho, \eta_{эф}, c), \quad (1)$$

де d – діаметр мішалки, м; λ – теплопровідність продукту,

$\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$; n – число обертів мішалки, с^{-1} ; ρ – густина продукту,

$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\eta_{эф}$ – ефективна в'язкість продукту, $\frac{\text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с})}{\text{м}^2}$; c – питома

теплоємність продукту, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.

Таким чином, маємо 7 величин, що впливають на процес, і 4 основних розмірності, що включають дані величини. Згідно з π -теоремою кількість критеріїв π , що входять у рівняння, дорівнює $n - m$, де n – кількість величин, що впливають на процес, m – одиниці виміру даних величин.

Згідно з π -теоремою рівняння (1) може бути надано у вигляді критеріального рівняння, до якого входить $n - m = 7 - 4 = 3$ критерію подібності.

Відомо, що тепловіддача в циліндричних судинах за умов руху рідини визначається рівнянням:

$$\frac{\alpha L}{\lambda} = C \left(\frac{w L \rho}{\eta} \right)^n \left(\frac{\eta c}{\lambda} \right)^m. \quad (2)$$

Це рівняння являє собою відоме співвідношення між

критеріями Нусельта, Рейнольдса та Прандтля. Критерій Рейнольдса, що є мірою відношення сил інерції та молекулярного тертя, визначає подібність режиму течії в системі. Критерій Прандтля, що є мірою відношення інтенсивності передачі кількості руху за рахунок молекулярного переносу та інтенсивності переносу кількості теплоти за рахунок вільної конвекції, визначає подібність температурних та швидкісних полів. Критерій Нусельта – безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі – розглядають як співвідношення між інтенсивністю теплопередачі та напруженою температурного поля в прикордонному шарі потоку теплоносія.

Значення коефіцієнта пропорційності C залежить від типу мішалки, геометричних співвідношень апарата та мішалки

Для описання процесів тепловіддачі за умов перемішування замінимо в наведеному рівнянні звичайне вираження критерію Рейнольдса вираженням відцентрового критерію Рейнольдса і тоді одержимо:

$$\frac{\alpha d_M}{\lambda} = C \left(\frac{\rho n d_M^2}{\mu} \right)^n \left(\frac{c \mu}{\lambda} \right)^m \Rightarrow Nu = C \cdot Re_u^n Pr^m, \quad (3)$$

де d_M – діаметр мішалки.

Рівняння (3) є експонентним співвідношенням між трьома перемінними, для яких на логарифмічному графіку зв'язок між функцією і кожним із двох аргументів зображується прямою.

Встановивши загальний вигляд критеріальної залежності з урахуванням впливу всіх основних параметрів процесу на теплообмін в апараті, далі визначали чисельні значення ступенів критеріїв, що входять у рівняння (3).

З огляду на те, що в критерії Рейнольдса та Прандтля входить в'язкість, емпіричну залежність для ефективної в'язкості від числа обертів мішалки представимо в наступному вигляді:

$$\eta = B_0 \left(\frac{n}{n_1} \right)^{-m}, \quad (4)$$

де B_0 – ефективна в'язкість за частоти обертів рівній одиниці ($n_1 = 1 \text{ c}^{-1}$), Па·с; m – темп руйнування структури.

На рис. 1 наведені експериментальні дані залежності ефективної в'язкості дослідженої реологічної рідини від частоти обертання мішалки, для якого знайдені значення коефіцієнтів $B_0=157 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $m=0,778$.

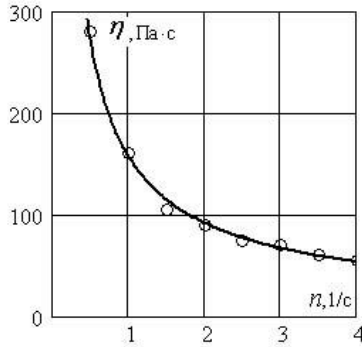


Рис. 1. Залежність ефективної в'язкості дослідженої реологічної рідини від частоти обертання мішалки

Для описання процесів тепловіддачі за умов перемішування замінимо в наведеному рівнянні звичайне вираження критерію Рейнольдса вираженням відцентрового критерію Рейнольдса з урахуванням залежності ефективної в'язкості від числа обертів мішалки:

$$\text{Re}_y = \left(\frac{\rho n d_M^2}{B_0} \right) \left(\frac{n}{n_1} \right)^m = \text{Re}_y^* \left(\frac{n}{n_1} \right)^m, \quad (5)$$

де $\text{Re}_y^* = \frac{\rho n d_M^2}{B_0}$ – модифікований відцентровий критерій Рейнольдса.

Критерій Прандтля з урахуванням вираження ефективної в'язкості набуває вигляду

$$\text{Pr} = \frac{B_0 c}{\lambda} \cdot \left(\frac{n}{n_1} \right)^{-m} = \text{Pr}^* \left(\frac{n}{n_1} \right)^{-m}, \quad (6)$$

де $\text{Pr}^* = \frac{B_0 c}{\lambda}$ – модифікований критерій Прандтля.

Тоді критеріальне рівняння теплообміну набуде вигляду

$$\frac{\alpha d_M}{\lambda} = C \left(\frac{\rho n d_M^2}{B_0} \right)^n \left(\frac{c B_0}{\lambda} \right)^k \left(\frac{n}{n_1} \right)^{m(n-k)}; \quad (7)$$

$$\text{Nu} = C \left(\text{Re}_y^* \right)^n \left(\text{Pr}^* \right)^k \left(\frac{n}{n_1} \right)^{m(n-k)}. \quad (8)$$

Для знаходження постійних коефіцієнтів C , n , k рівняння (7)

перепишемо у вигляді, зручному для проведення регресійного аналізу

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_3, \quad (9)$$

$$\text{де } Y = \ln(\text{Nu}); \quad X_1 = \ln \left[\text{Re}_y^* \left(\frac{n}{n_1} \right)^m \right]; \quad X_2 = \ln \left[\text{Pr}^* \left(\frac{n}{n_1} \right)^{-m} \right];$$

$$a_0 = \ln C; \quad a_1 = n; \quad a_2 = k.$$

Коефіцієнти регресійного рівняння знаходили з використанням стандартних процедур пакета MathCAD. Відносна погрішність критеріального рівняння 5% у діапазоні частот обертів мішалки 0,5-4 с⁻¹.

$$\text{Nu} = (\text{Re}_y^*)^{0,667} (\text{Pr}^*)^{0,536} \left(\frac{n}{n_1} \right)^{0,131n}. \quad (10)$$

Результати регресійного аналізу наведені на рис. 2.

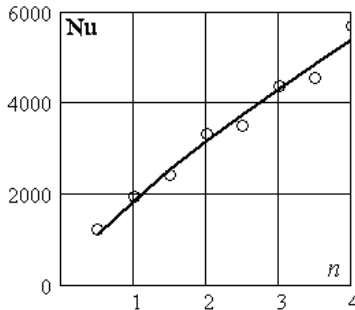


Рис. 2. Залежність критерію Нусельта від частоти обертів мішалки: ○ – експериментальні дані; — критеріальне рівняння

Висновки. Таким чином, отримана узагальнена критеріальна залежність для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі за умов використання розробленої скребкової мішалки в умовах уварювання пастоподібних концентратів напоїв під вакуумом. Це рівняння може знайти застосування під час розрахунку та проектування теплового устаткування для виробництва ПКН.

Список літератури

1. Пат. № 70703 А Україна, А 21 С 1/00 Пристрій для перемішування в'язких харчових продуктів [Текст] / Черевко О.І., Маяк В.І., Маяк О.А. ; заявник та патентовласник ХДУХТ (Україна). – №

20031212230 ; заявл. 24.12.2003 ; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10 – 4 с.

2. Скрипников, Ю.Г. Технологія переробки плодів і ягід [Текст] / Ю.Г. Скрипников. – К. : Урожай, 1991. – 272 с.

3. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах [Текст] / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.

4. Штербачек, З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности [Текст] / З. Штербачек, П. Тауск. – Л. : ГХИ, 1963. – 416 с.

5. Маслов, А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей [Текст] / А.М. Маслов. – Л.: Машиностроение, ленинградское отделение, 1980. – 208 с.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ ВЯЗКИХ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

Исследован процесс уваривания овощного пюре при производстве пастообразных концентратов напитков. В результате проведенных экспериментов получено критериальное уравнение процесса теплоотдачи, в котором учтены изменения реологических свойств увариваемого продукта.

Abstract

RESEARCH THE PROCESS OF HEAT EMISSION BY THE CONCENTRATION OF VISCOUS FOOD SYSTEMS

Investigational process of cooking of vegetable puree during the production of paste-like concentrates of drinks. As a result of the conducted experiments criterion equalization of process of heat emission, the changes of reological properties of product which concentrated are taken into account in which, is got.