

УДК 664.143

## МОДЕЛЮВАННЯ І ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПЛАСТИФІКАТОРА ВВ-ПМЛ

**В.А. Хомічук**, кандидат технічних наук, доцент\*, *E-mail*: ash1961@mail.ru

**О.І. Бескровний**, кандидат технічних наук, доцент\*\*

**В.В. Макаринський**, магістр\*

\*Кафедра процесів, обладнання та енергетичного менеджменту

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039

\*\*Кафедра вищої математики та інформаційних систем

Донецький національний університет економіки і торгівлі, м.Кривий Ріг

**Анотація.** У статті досліджено робочий процес пластифікації кондитерських мас у пластифікаторі ВВ-ПМЛ. Розглянуто реологічну модель руйнування кондитерських блоків під дією динамічного навантаження у маслорізці пластифікатора ВВ-ПМЛ у вигляді диференціального рівняння. За цією моделлю одержано розрахункові залежності напружень від швидкості ударяючої маси, які дозволяють визначити конструктивні характеристики механічного обладнання та параметри процесів. Запропоновано нестационарну модель механізму прогрівання кондитерських мас з реологічними параметрами, залежними від температури та показано, що процес прогрівання визначається як внутрішніми, так і зовнішніми термічними опорами. Побудовано статистичну модель процесу аерування кондитерської маси, на основі якої встановлено, що оптимальними характеристиками процесу аерування даного кондитерського жиру є: час вимішування – від 570 до 600 с; температура води у сорочці – від 39 до 40 °С. Методами чисельного моделювання показано: рух лопаті пластифікатора ВВ-ПМЛ є динамічно стійким; перемішування відбувається значно інтенсивніше при куті нахилу лопатей змішувача до осі валу 60° та наявності отворів. Визначено оптимальну форму отворів та їх площу у лопатях змішувача.

**Ключові слова:** пластифікатор ВВ-ПМЛ, параметри процесу, математичне і чисельне моделювання, пластифікація, кондитерська маса.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПЛАСТИФИКАТОРА ВВ-ПМЛ

**В.А. Хомичук**, кандидат технических наук, доцент\*, *E-mail*: ash1961@mail.ru

**А.И. Бескровный**, кандидат технических наук, доцент\*\*

**В.В. Макаринский**, магистр\*

\* кафедра процессов, оборудования и энергетического менеджмента

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

\*\* кафедра высшей математики и информационных систем

Донецкий национальный университет экономики и торговли, Кривой Рог

**Аннотация.** В статье исследованы рабочий процесс пластификации кондитерских масс в пластификаторе ВВ-ПМЛ. Рассмотрена реологическая модель разрушения кондитерских блоков под действием динамической нагрузки в маслорезке пластификатора ВВ-ПМЛ в виде дифференциального уравнения. По этой модели получены расчетные зависимости напряжений от скорости ударяемой массы, которые позволяют определить конструктивные характеристики механического оборудования и параметры процессов. Предложена нестационарная модель механизма прогресса кондитерских масс с реологическими параметрами, не зависящими от температуры и показано, что процесс прогресса определяется как внутренними, так и внешними термическими опорами. Построена статистическую модель процесса аэрирования кондитерской массы, на основе которой установлено, что оптимальными характеристиками процесса аэрирования данного кондитерского жира являются: время замешивания – от 570 до 600 с; температура воды в рубашке – от 39 до 40 °С. Методами численного моделирования показано: движение лопасти пластификатора ВВ-ПМЛ является динамично устойчивым; и наличии отверстий, перемешивания происходит значительно интенсивнее при угле наклона лопастей смесителя к оси вала 60° Определена оптимальная форма отверстий и их площадь в лопастях смесителя.

**Ключевые слова:** пластификатор ВВ-ПМЛ, параметры процесса, математическое и численное моделирование, пластификация, кондитерская масса.



Copyright © 2015 by author and the journal "Food Science and Technology".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

### Вступ. Постановка проблеми

Завдання ресурсозбереження у кондитерському виробництві в умовах насичення ринку є особливо важливим. Внаслідок цього розвиток вироб-

ництва повинен ґрунтуватись на устаткуванні, яке реалізує технологічні процеси, режими яких забезпечують при мінімально можливих ресурсовитратах високу якість готової продукції.

У харчових технологіях, зокрема, у виробництві цукерок, шоколаду, борошняних кондитерських виробів жири тваринного і рослинного походження є одним з найважливіших компонентів. На підприємства вони потрапляють у вигляді блоків масою 20 – 25 кг. Перед подачею на операцію складання рецептурних сумішей їх як правило розплавляють. З точки зору ресурсозбереження це є нерациональним, так як після утворення суміші її необхідно охолоджувати перед формуванням [1]. Таким чином, застосування пластикації для перетворення жирових блоків з твердого у пластичний стан та створення відповідного обладнання для виробництва є актуальним.

### Огляд літератури

Так як жировмісні кондитерські вироби становлять значну частину продукції кондитерської промисловості як у вартісному так і об'ємному вираженні, питання отримання і застосування пластикованих кондитерських мас досліджувалось у роботах С.А. Мачихіна, Л.М. Аксьонової, М.А. Талейсника, С.В. Чувахіна, С.М. Носенка [1,2].

Розглянемо сучасний технологічний процес застосування пластикованої жирової сировини для приготування кондитерських мас, основи якого зроблено у дослідженнях науковців НДКП (Росія) і рекомендовано до застосування у технологічних процесах з приготування різноманітних кондитерських виробів.

Наприклад, при виготовленні вафельної начинки [1] для забезпечення високих смакових достоїнств, ніжного смаку танення начинку необхідно добре збити (мати відносно низьку густину), вся сировина повинна бути рівномірно розподілена у всьому об'ємі. Тверді частинки не повинні відчуватися на язичі людини, для чого добиваються, щоб кількість частинок розміром до 25 мкм складала не менше 92 %. Технологічні показники начинки, у тому числі її реологічні характеристики повинні забезпечити виконання подальших операцій в потці: намазування листів, утворення пластів, їх охолодження, різання на вироби і упаковку.

У даний час жирові начинки готують на устаткуванні, вибір якого часто носить випадковий характер. Тому забезпечити високу кінцеву однорідність розподілу компонентів (що є однією з умов отримання пишної, легкої начинки з ніжним смаком танення) у ряді випадків задача важка для здійснення. Традиційна технологія приготування начинок передбачає перекачування готової начинки до намазуючої машини по трубопроводу з допомогою насосних установок. Для забезпечення механізації перекачування начинки, з метою зниження її в'язкості, використовується жир в рідкому стані, що перешкоджає отриманню збитої, пишної начинки. Окрім цього, перекачування начинки системою трубопроводів через їх незадовільний санітарний

стан приводить до різкого погіршення мікробіологічних показників і, як наслідок, до зниження терміну придатності готових виробів.

Запропоновано спосіб приготування начинки, який передбачає попереднє відстоювання блоків жирового компоненту при температурі 20 – 25 °С протягом 18 – 24 годин, що забезпечує його кращу рівномірну пластикацію в місильній машині з Z-подібними лопатями та вибором певної частоти обертання лопатей і отримання однорідної пластичної структури з заданою густиною 750 – 850 кг/м<sup>3</sup>. Така густина жирового компоненту забезпечує при змішуванні його в місильній машині з цукровим піском або цукровою пудрою та рештою рецептурних компонентів необхідну пишність начинки і можливість її подачі безпосередньо після приготування в воронку намазуючої машини.

Наведені дані дозволяють стверджувати, що пластикація кондитерських мас є одним з перспективних напрямків розвитку кондитерської промисловості. Однак для подальшого зростання виробництва і розширення асортименту продукції, що випускається, необхідно прийняти низку комплексних заходів для подальшого успішного просування технології і засобів пластифікації та створити відповідне обладнання.

Розглянемо конкретну конструкцію змішувача для переведення твердого жиру у в'язкопластичний стан. Автором [2] пропонується технологічний простір агрегату розділити на відповідні зони, які повинні забезпечувати:

- у зоні завантаження – розділення блоків жиру на окремі частини у вигляді брусків, стружки і т.п.;
- у зоні підпресування – примусову подачу матеріала на пластикацію;
- у зоні пластикації – остаточне подрібнення і первинну пластикацію;
- у зоні пластикації – нагнітання-отримання однорідної в'язкопластичної маси;
- у зоні вивантаження – рівномірну подачу пластикованого матеріалу на наступну технологічну операцію.

Проведено аналіз існуючих конструкцій і зроблено висновок, що найбільш раціональною є машина зі спареними шнеками у змішувачі, які тісно зчеплені і обертаються у протилежних напрямках, причому всі етапи від подрібнення блоків до пластикації доцільно виконувати однорідними робочими органами.

### Моделювання робочого процесу

Метою статті є теоретичне обґрунтування технологічного процесу пластифікатора ВВ-ПМЛ та розроблення обґрунтованої методики для визначення раціональних режимів його роботи.

Математичне моделювання процесу пластифікації у роботі здійснювали послідовно по зонам. Наведено диференціальні рівняння, які описують напружений стан продукту та умову появи пластичних деформацій (умова текучості), при якій починається руйнування продукту. Отримано розв'язок задачі, а також обчислено потужності, які необхідні для різання, стиснення, подрібнення, подолання сил тертя та на перемішування.

Для перевірки отриманих залежностей у відповідності з вибраною схемою було спроектовано і виготовлено експериментальну установку для пластикації жирів. Продуктивність пластикатора визначали ваговим методом, загальну споживану потужність за показниками відповідних приладів. Розрахунки за математичними моделями показали, що при пластифікації жиру ІЛЛЕКСАО – 30 – 97 від 40 – 70 % потужності необхідно витратити на різання матеріалу гвинтами, по мірі зменшення брусків жиру і підвищення температури внаслідок механічних дій споживання потужності знижується від 27 до 50 %. Споживання потужності пластикуючими гвинтами складає не більше 5 %, що входить у похибку її експериментального визначення і при розрахунках може не враховуватись.

Порівняння експериментальних даних для різних жирів з розрахунками показало, що розходження складають від 14 до 26 % по потужності і від 7 до 15 % по продуктивності. Тобто математична модель адекватно описує механічні процеси, які протікають при пластифікації жирів.

В інших роботах С.В. Чувахіна і С.М. Носенка [2] визначено вплив режимів механічної обробки і технологічних режимів та показників пралинової маси на енерговитрати процесів ви-

мішування і перетирання. Досліди проводили на універсальній установці Do-Corder (ФРН), яка обладнана робочою камерою об'ємом 9 л, і в якій розташовані два Z - подібні робочі органи з відношеннями частот обертання 1:1,5. В роботі показано, що при збільшенні частоти обертання робочих органів пластична в'язкість і гранична напруга зсуву зменшуються. Таким чином, необхідна консистенція маси може бути отримана підвищенням інтенсивності її механічної обробки.

Розгляд питання про визначення енерговитрат в резервуарах із змішувачими пристроями та отримані результати базуються в значній мірі на відомих роботах Стренка Ф., Штербачека З, Барабаша В.М., Бегачова В.І., Брагінського Л.М. [3-5]. У роботі [5] проаналізовано підсумки цих досліджень та сформульовано актуальні питання їх подальшого розвитку.

Для визначення оптимальних характеристик роботи змішувача необхідно побудувати математичні моделі процесів змішування у двовальному лопатевому змішувачі, які дадуть можливість оцінити якість перемішування.

Математичні моделі, які використовувались, розраховані на специфіку досліджуваного обладнання і не можуть бути автоматично перенесені на інше технологічне устаткування для пластикації твердих жирів.

Технологічний процес пластифікації (розм'якшування) кондитерських мас для її подальшого використання у потокових лініях кондитерського виробництва, що здійснюється у пластикаторі ВВ-ПМЛ [6], можна умовно розділити на дві основні стадії, представлені на рисунку 1.

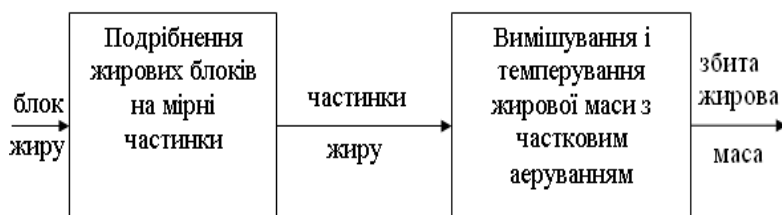


Рис. 1. Структурна схема технологічного процесу у ВВ-ПМЛ

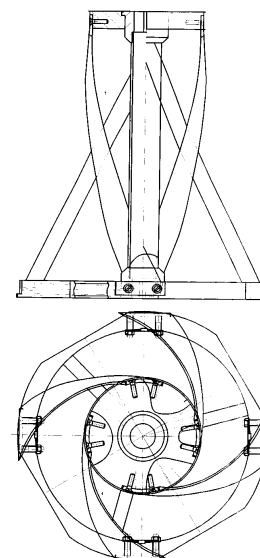


Рис. 2. Ніж маслорізки пластифікатора ВВ-ПМЛ

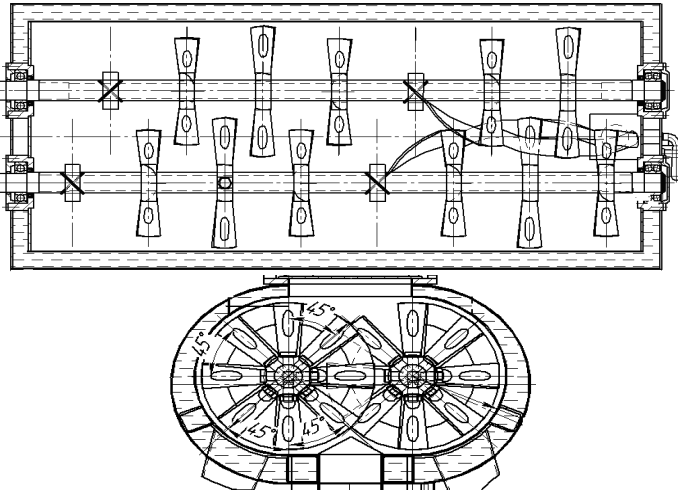


Рис. 3. Змішувач пластифікатора ВВ-ПМЛ

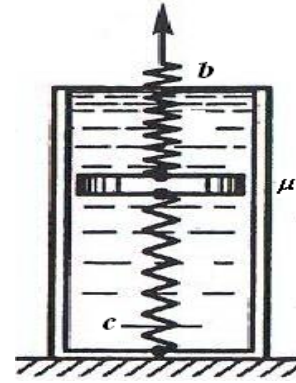


Рис. 4. Реологічна модель жирів

На стадії подрібнення відбувається розділення стандартних жирових блоків на мірні частинки за допомогою ріжучого механізму маслорізки, ножі якого закріплені у вигляді зрізаного конуса під кутом до його осі (рисунок 2). Подрібнена жирова суміш з кусків неправильної форми з розмірами від  $0,05 \times 0,03 \times 0,04$  м до  $0,06 \times 0,06 \times 0,15$  м потрапляє у змішувач (рисунок 3) з водяною сорочкою. У ньому жир швидко нагрівається, інтенсивно перемішується, перетирається і частково аерується.

У відповідності до описаного технологічного процесу на першому етапі ми побудували модель руйнування блоків жиру у маслорізці.

Модель руйнування жирових блоків під дією динамічного навантаження у маслорізці пластифікатора ВВ-ПМЛ описується реологічною моделлю (рисунок 4), якій відповідає диференціальне рівняння

$$l m \left( \frac{d^3 \varepsilon}{dt^3} + r \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} \right) + b \left( \frac{d\varepsilon}{dt} + n \varepsilon \right) = 0 \quad (1),$$

де  $r = \frac{1}{\tau_\varepsilon}$  – коефіцієнт інтенсивності релаксації;

$b, c$  – коефіцієнти жорсткості;

$l$  – довжина блоку;  $S$  – площа перерізу блоку;  $m$  – маса леза ножа маслорізки; з початковими умовами:

$$\varepsilon = 0, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v}{l}, \quad \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = 0 \quad \text{при } t = 0 \quad (2)$$

де  $v$  – початкова швидкість маслорізки. Руйнування блоку жиру відбудеться, якщо виконується одна із умов (3):

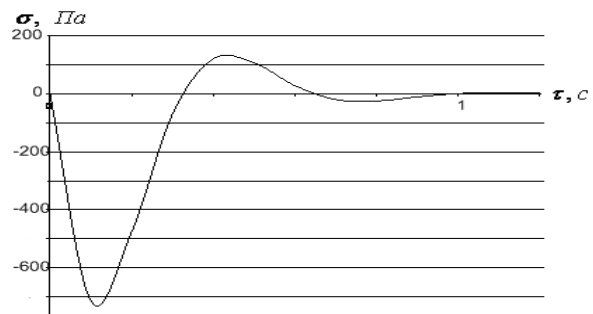
$$b \left[ C \frac{\gamma_1 + n}{\gamma_1 + r} (e^{\gamma_1 t} - e^{-r t}) + C_2 \frac{\gamma_2 + n}{\gamma_2 + r} (e^{\gamma_2 t} - e^{-r t}) + \right.$$

$$\left. + C_3 \frac{\gamma_3 + n}{\gamma_3 + r} (e^{\gamma_3 t} - e^{-r t}) \right] > \sigma_b \quad (3)$$

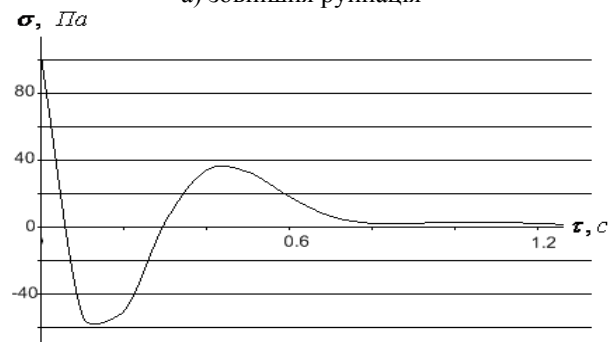
$$- \frac{bn}{r-n} e^{-r t} \left[ C_1 \frac{\gamma_1 + n}{\gamma_1 + r} + C_2 \frac{\gamma_2 + n}{\gamma_2 + r} + C_3 \frac{\gamma_3 + n}{\gamma_3 + r} \right] > \sigma_*$$

де  $n = \frac{1}{\tau_\sigma}$  – коефіцієнт інтенсивності післядії;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – корені характеристичного рівняння.



а) зовнішня руйнація



б) внутрішня руйнація

Рис. 5. Модельні залежності напружень у блоці жиру від часу

Із залежностей, графіки яких наведено на рисунку 5, випливає, що напруження  $\sigma_2$  в продукті, яке відповідає внутрішній руйнації, значно менше за напруження  $\sigma$ , яке відповідає зовнішній руйнації, тому руйнування блоку жиру відбудеться приблизно через  $t_0 \approx 0,02c$  за рахунок внутрішньої руйнації [6].

Для розрахунку швидкості прогрівання окремого бруска жиру розв'яжемо нестационарну задачу теплопровідності, яка описується рівнянням (4)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $a = \frac{\lambda}{c\rho} \left[ \frac{m^2}{c} \right]$ ;

з умовою однозначності у вигляді початкової і граничної умов:

1) у початковий момент часу тіло має температуру

$$T_0 = T(x, y, z, t = 0); \quad (5)$$

2) прогрівання відбувається за конвективних граничних умов

$$\left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = -\frac{h}{\lambda} (T_n - T_\infty), \quad (6)$$

де  $T_\infty$  – температура у бункері [K],  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі [ $Bm/m^2 \cdot K$ ],  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності [ $Bm/(m \cdot K)$ ].

Враховуючи залежність реологічних характеристик від температури, проведемо чисельне моделювання процесу прогрівання бруска маргарину за допомогою програмного комплексу ANSYS. Розрахунки за цією моделлю та отримані результати дають можливість стверджувати, що при значеннях критерія Біо  $0.1 < Bi \approx 15.85 < 100$  процес нагрівання бруска маргарину розмірами від 0,02 до 0,03 м дійсно визначається як внутрішнім, так і зовнішнім термічними опорами і не залежить від кута скошування паралелепіпеда.

У результаті проведення нестационарного аналізу нами отримано залежність розподілу температурного поля в тілі паралелепіпеда від часу. На рисунку 7 наведено графік залежності зміни температури за часом у кутовій точці бруска жиру. Графік залежності виходить на плато, що свідчить про перехід процесу прогрівання у стаціонарний процес через приблизно 3 хвилини, що добре узгоджується з експериментальними даними інших авторів [7].

На наступному етапі проведемо математичне моделювання процесу аерування жирових мас. Потік маси пробиває великі бульбашки повітря, за-

тянуті у жирову масу шнеколопатевую мішалкою (рисунк 8), за умови  $v > 2 \sqrt{\frac{2\alpha}{3RC\rho_e}}$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу повітря на границі з кондитерською масою;  $\rho_{жс}$  – густина маси,  $\frac{kg}{m^3}$ ;  $v$  – швидкість потоку,  $\frac{m}{c}$ ;  $C$  – коефіцієнт, значення якого для кулі приблизно дорівнює 0,1 [8].

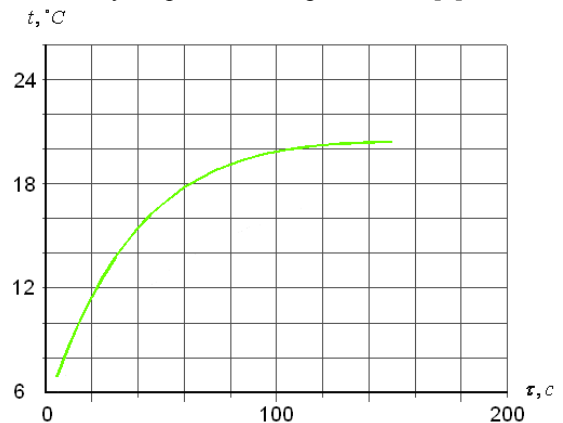


Рис. 7. Зміна температури з часом у кутовій точці бруска жиру

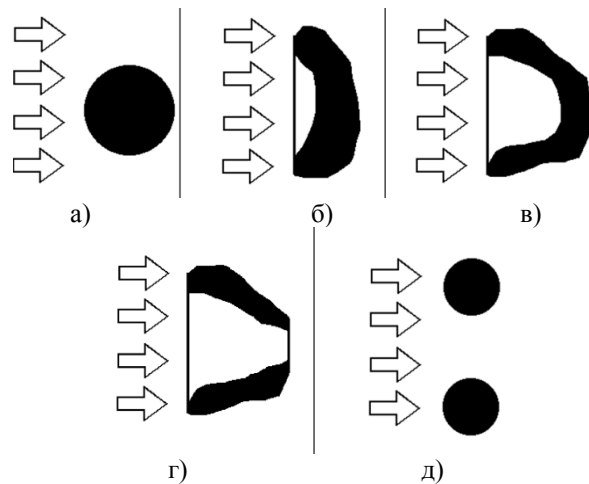


Рис. 8. Зміна форми повітряної бульбашки у потоці

Оскільки максимальна швидкість потоку перевищує критичну, то потік розбиває початкову бульбашку радіуса  $R$  на  $n$  бульбашок, при цьому виконується умова (7).

$$\left( P_0 + \frac{2\alpha}{R} \right) \cdot R^3 = \left( P_0 + \frac{2\alpha}{R_1} \right) \cdot R_1^3 + \left( P_0 + \frac{2\alpha}{R_2} \right) \cdot R_2^3 + \dots + \left( P_0 + \frac{2\alpha}{R_n} \right) \cdot R_n^3, \quad (7)$$

Показано, що при температурі води у сорочки 42 °C повітря рівномірно розподіляється у жировій масі і відбувається аерування кондитерсь-

кого жиру. При температурі води у сорочці до 37°C не забезпечується необхідна рухомість жирової маси і знижується рівномірність розподілу повітря у жирі.

Для визначення якості перемішування знайдемо відносні концентрації повітряної компоненти  $C_{ij}$  в  $n$  довільно вибраних точках змішувача при  $l$  паралельних випробуваннях ( $i$  – номер точки, у якій досліджується процес,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j$  – номер випробування,  $j = 1, 2, \dots, l$ ). Диференціальне рівняння для вибірки із  $nl$  проб, взятих в  $n$  довільно вибраних точках змішувача при  $l$  паралельних випробуваннях у кожній точці має вигляд:

$$\frac{d(c_{ij} - m)}{dt} = -k(c_{ij} - m)^2 + kDc_{ij}, \quad i=1,2,\dots,n; \quad j=1,2,\dots,l \quad (8)$$

Здійснивши перехід від концентрації повітряної компоненти до її вибіркової дисперсії, яка характеризує якість аерування кондитерської маси, запишемо відповідне диференціальне рівняння

$$\frac{\sqrt{nl} d \sqrt{\sigma^2}}{nldt} = -k(\sigma^2 - \sigma_c^2), \quad (9)$$

де  $\sigma_c^2$  – дисперсія сегрегації.

При достатньо великих значеннях часу  $t \rightarrow \infty$  досягається гранична якість суміші  $\sigma_p^2$ , коли процес аерування знаходиться у динамічній рівновазі.

Якщо припустити, що між дисперсією процесу розподілення і сегрегації існує лінійний зв'язок, то отримаємо залежність вибіркової дисперсії концентрації повітряної компоненти кондитерської маси від часу (10).

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 \frac{\left( \left( \sqrt{\sigma_p^2} + 1 \right) - \left( \sqrt{\sigma_p^2} - 1 \right) \exp \left( - \frac{2k\sqrt{nl}\sqrt{\sigma_p^2}}{1 - \sigma_p^2} t \right) \right)^2}{\left( \left( \sqrt{\sigma_p^2} + 1 \right) + \left( \sqrt{\sigma_p^2} - 1 \right) \exp \left( - \frac{2k\sqrt{nl}\sqrt{\sigma_p^2}}{1 - \sigma_p^2} t \right) \right)^2} \quad (10)$$

Для ідентифікації і перевірки математичної моделі було поставлено серію паралельних дослідів з перемішування жирових мас у двовалковому шнеколопатевому змішувачі пластифікатора ВВ-ПМЛ. Експериментальні і розраховані за моделлю (10) криві наведено на рисунках 9 і 10.

Як слідує з рисунків 9 і 10, результати математичного моделювання задовільно узгоджуються з експериментальними даними [9].

Провівши аналіз параметрів процесу аерування жирової маси, визначаємо що основними факторами, які найсуттєвіше впливають на неї, є тем-

пература води у сорочці і час вимішування. Побудуємо регресійну модель процесу аерування на основі статистичного аналізу експериментальних даних, яка дає змогу прогнозувати вихідні показники якості за різних значень керуючих факторів:

$$z_1 = 104 + 13,8u + v - 5uv - 15,5u^2 - 11v^2 \quad (11)$$

де  $u$  і  $v$  – кодовані значення факторів часу вимішування і температури водяної сорочки відповідно ( $z_1$  – концентрація повітряної компоненти,  $R^2 = 0,92$ ).

На основі аналізу отриманого рівняння регресії (рис. 11) з'ясовано, що концентрація повітряної компоненти у жировій масі більш суттєво залежить від часу, ніж від температури, оптимальними характеристиками процесу аерування досліджуваного кондитерського жиру є: час вимішування – від 570 до 600 с; температура води у сорочці – від 39 °C до 40 °C [9,10].

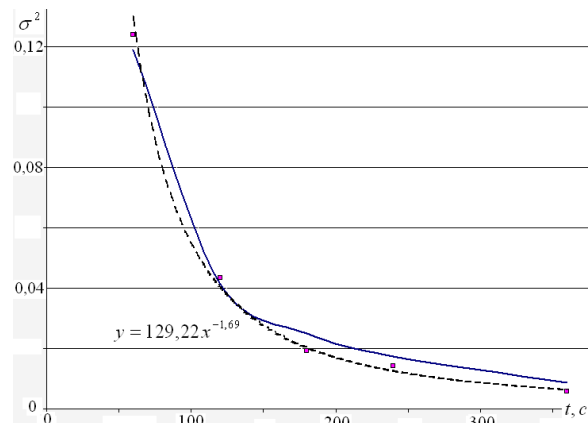


Рис. 9. Експериментальна (---) і розрахункова (—) криві дисперсії концентрації за часом для маргарину

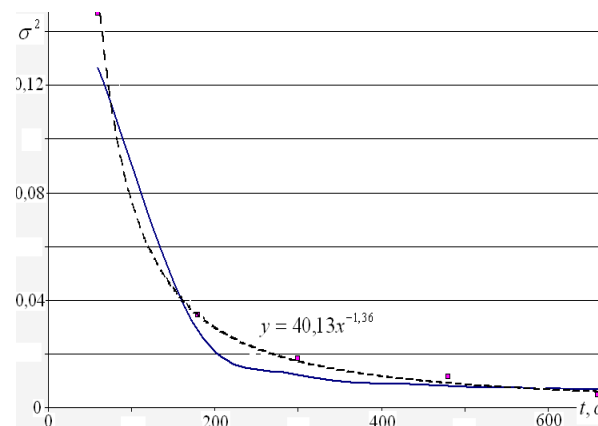


Рис. 10. Експериментальна (---) і розрахункова (—) криві дисперсії концентрації за часом для жиру

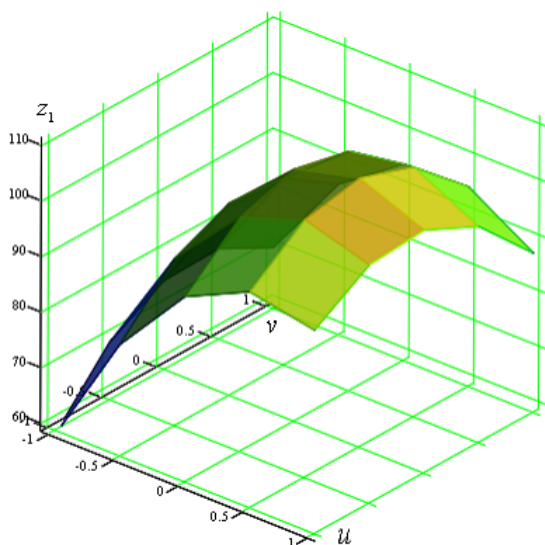


Рис. 11. Регресійна поверхня відгук

Методики, які описують течію рідких неньютонівських мас [3-5], ґрунтуються на експериментальних даних і є специфічними для кожного типу змішувача. У змішувачі пластифікатора ВВ-ПМЛ оскільки вали обертаються у протилежних напрямках, лопаті одного валу переміщують жирову масу вздовж корпусу змішувача в одному напрямку, лопаті іншого валу – у протилежному напрямку, утворюючи, таким чином, кільцевий рух маси в плані контуру змішувача. При такому русі майже виключаються зустрічні потоки жирової маси в межах зон кожного валу, у зв'язку з чим у розрахунковій моделі для змішувача ми не будемо враховувати опір від зустрічних потоків. Крім того, кільцевий рух маси з перенесенням її часток з валу на вал та одночасне зміщення в зону вивантаження інтенсифікують процес утворення однорідної маси. Тому більшість лопатей обох валів знаходяться в ідентичних умовах, як за ступенем завантаження, так і за однорідністю робочої маси. Така особливість процесу вимішування дозволяє розглянути роботу однієї лопаті як рівнозначної для усіх лопатей.

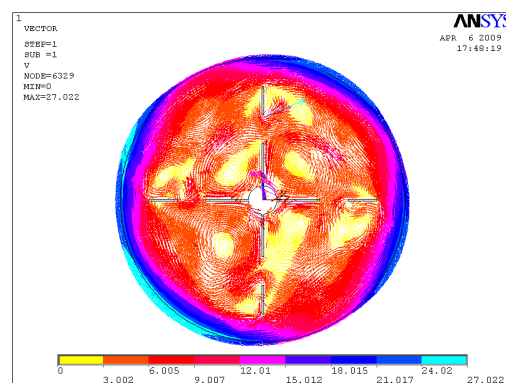
За допомогою програмного комплексу ANSYS виконаємо чисельне моделювання процесу течії жирових мас у змішувачі пластифікатора ВВ-ПМЛ, лопаті мішалок якого розгорнуті відносно осі валу на кути 30°, 45° та 60°.

Нами отримано візуальні траєкторії руху частинок жирової маси у змішувачі та їх швидкості (рис. 12). Перемішування відбувається значно інтенсивніше при куті нахилу лопаті до осі валу 60°.

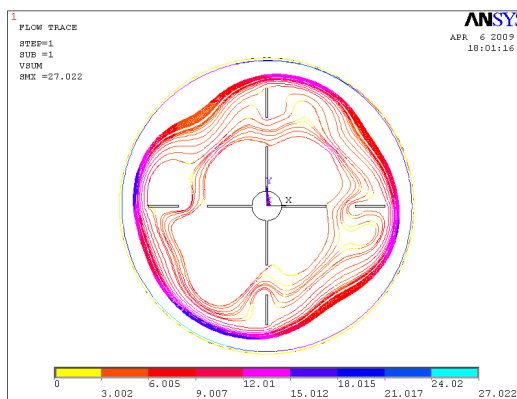
З аналізу розподілу швидкостей при відсутності та наявності отворів у лопаті змішувача випливає, що наявність отворів значно підсилює завихрювання течії жирової маси і підвищує інтенсивність перемішування. Визначено загальну оптима-

льну площу отворів у лопатях змішувача, яка становить близько 30 % від площі [11].

Нами розв'язано задачу визначення оптимальних розмірів отворів та їх геометричної форми за допомогою методів математичного програмування. При збереженні необхідної інтенсивності перемішування більш доцільним є використання у змішувачі пластифікатора ВВ-ПМЛ лопатей з отворами прямокутної форми [12].



а



б

Рис. 12. а) розподіл швидкості жирової маси у площині обертання змішувача при куті нахилу лопаті 60° та площі отворів 30% від площі лопаті; б) циркуляційні петлі руху жирової маси

## Висновки

Отримані аналітичні залежності та розроблені методи розрахунків дають можливість отримувати параметри процесу пластикації жировмісних мас у пластифікаторі ВВ-ПМЛ, враховуючи його конструктивні особливості. Значна частина цих результатів може бути застосована для подібного обладнання інших галузей промисловості.

Перспективами подальших досліджень у цьому напрямку є розроблення математичних моделей кожного етапу і технологічного процесу в цілому для створення автоматизованої системи управління ним.

### Список літератури:

1. Система технологий и оборудования для кондитерской промышленности [Текст] / Л.М. Аксенова [и др.]; под общ. ред. Л.М. Аксеновой. НИИ кондит. пром-сти. – М.: 1997. – 512 с.

2. Чувахин, С.В. Научно-практические основы интенсификации механических процессов при образовании высоковязких кондитерских масс: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М.: МТИПП, 1990. – 50 с.
3. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст] / Ф. Стренк. Польша, 1971. Перевод с польск. под ред. Щупляка И.А. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
4. Штербачек, З. Перемешивание в химической промышленности [Текст] / З.Штербачек, П.Тауск. – Л.: Госхимиздат, 1963. – 416 с.
5. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета [Текст] / Л.Н. Брагинский В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
6. Lavrinenko, N. Mathematical Modelling of Fat Blocks' Breakdown under Dynamic Load in the Plasticizer's Oil-Cutting Machine VV-PML. [Текст] / N. Lavrinenko, O. Beskrovnyy // Economic Debates, 2008. – 8 Ani, nr.11 – Editura Ecran Magazin, Brasov, Romania. – P. 1-7.
7. Lavrinenko, N. Simulation of the transient heat transfer process in margarine under its plastification [Текст] / N. Lavrinenko, O. Beskrovnyy // New Research in Food and Tourism, 2008.–vol. 1, J. of Agritourism. Bulletin of Agri-ecology, Agri-food, Bioengineering and Agritourism. – Transilvania University of Brashov, Romania, 2008. – P. 444 – 449
8. Лавріненко, Н.М. Моделювання процесу аерування жирової маси у пластифікаторі ВВ-ПМЛ [Текст] / Н.М. Лавріненко, О.І. Бескровний // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2008. – Вип. 33. – С. 109-114.
9. Лавріненко, Н.М. Обґрунтування раціональних режимів аерування жирової маси у пластифікаторі ВВ-ПМЛ [Текст] / Н.М. Лавріненко, В.А. Хомічук, О.І. Бескровний, О.М. Горін // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр.. –Донецьк: ДонНУЕТ, 2009. – Вип. 20. – С. 118-125.
10. Лавріненко, Н.М. Дослідження і оптимізація якості жирової маси у пластифікаторі ВВ-ПМЛ [Текст] / Н.М. Лавріненко, В.А. Хомічук, О.І. Бескровний // Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського № 1(45), 2010. серія Технічні науки. – Донецьк: 2010.– С. 82-89.
11. Лавріненко, Н.М. Комп'ютерне моделювання течії жирової маси у змішувачі пластифікатора ВВ-ПМЛ [Текст] / Н.М. Лавріненко, О.І. Бескровний // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. –Донецьк: ДонНУЕТ, 2009. – Вип. 22. – С. 254-262.
12. Лавріненко, Н.М. До питання оптимізації форми лопатей пластифікатора ВВ-ПМЛ [Текст] / Н.М. Лавріненко, О.І. Бескровний // Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського № 1(45), 2010. серія Технічні науки. – Донецьк: 2010.– С. 38-42.

## SIMULATION AND GROUNDING OF VV-PML PLASTICIZER'S WORKING PROCESS

V.A. Homichuk, Ph.D., Associate Professor\*, E-mail: ash1961@mail.ru

O.I. Beskrovnyi, Ph.D., associate professor\*\*

V.V. Makarynskyi, master\*

\* Department of processes, equipment and energy management  
Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatna str., Odessa city, Ukraine, 65039

\*\* Department of Mathematics and Information Systems  
Donetsk National University of Economics and Trade, Krivoy Rog

**Abstract.** This article deals with an investigation of confectionery mass plastification processes in a VV-PML plasticizer through mathematical modelling and with the use of advanced computer technologies.

A rheological model of fat blocks' rupture under dynamic load in the butter cutter of the VV-PML plasticizer in the form of differential equation has been proposed. Under this model design parameters of stress dependence from the speed of the striking mass have been calculated, which allow to determine design characteristics of mechanical equipment and process parameters.

A mathematical model for the mechanism of fat heating with rheological characteristics that depend on the temperature has been developed. The analysis of numerical results obtained from solution of a transient heat transfer problem has shown that the heating-up process depends on internal as well external thermal resistance.

A statistical model for the aeration process of the confectionery mass has been built. On the basis of this model it has been found that the aeration process occurs most intensively during the first two minutes when the dispersion of air component concentration drops by 75 – 82 %, that complies well with experimental data. With the aid of the built regression model it has been discovered that the most optimal characteristics of plasticization process of this confectionery fat are the following: mixing time – from 570 to 600 seconds; water temperature in the jacket – from 39 to 40 °C.

By the method of numerical modelling using the ANSYS program it has been shown that the motion of VV-PML plasticizer blade is dynamically stable; that the agitation occurs more intensively at the inclination angle of mixer blades to the axis shaft of 60° and the presence of holes (30 % from the blade area).

**Keywords:** VV-PML plasticizer, process parameters, mathematical and numerical modelling (simulation), plasticization, confectionery mass.

### Reference:

1. Aksenova LM i dr. Sistema tekhnolohii i oborudovanyia dlia konditerskoi promyshlennosti. pod obshch. red. L.M. Aksenovoi. NYY kondit. prom-sti. M.: 1997; 512.



2. Chuvakhyn SV. Nauchno-praktycheskiye osnovy intensivatsii mekhanycheskikh protsessov pri obrazovanii vysokoviazkikh konditerskikh mass: Avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk. M.: MTYPP, 1990; 50.
3. Strenk F. Peremeshyvanie i apparaty s meshalkami. Polsha, 1971. Perevod s polsk. pod red. Shchupliaka Y.A. L.: Khimiyia, 1975; 384.
4. Shterbachek Z, Tausk P. Peremeshyvanie v khimicheskoi promyshlennosti .. L.: Hoskhimizdat, 1963; 416.
5. Brahinskyi LN, Behachev VY, Barabash VM. Peremeshyvanie v zhydkykh sredakh: Fyzycheskie osnovy i inzhenernye metody rascheta. L.: Khimiyia, 1984; 336.
6. Lavrinenko N, Beskrovnyy O. Mathematical Modelling of Fat Blocks' Breakdown under Dynamic Load in the Plasticizer's Oil-Cutting Machine VV-PML. Economic Debates. 8 Ani, nr.11 Editura Ecran Magazin, Brasov, Romania. 2008; 1-7.
7. Lavrinenko N, Beskrovnyy O. Simulation of the transient heat transfer process in margarine under its plastification. New Research in Food and Tourism. J. of Agritourism. Bulletin of Agri-ecology, Agri-food, Bioengineering and Agritourism. Transilvania University of Brashov, Romania, 2008; 1: 444-449
8. Lavrinenko N, Beskrovnyy O. Modeliuvannia protsesu aeruvannia zhyrovoi masy u plastyfikatori VV-PML. Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. Odesa. 2008; 33: 109-114.
9. Lavrinenko NM, Khomichuk VA, Beskrovnyi OI, Horin OM. Obhruntuvannia ratsionalnykh rezhymiv aeruvannia zhyrovoi masy u plastyfikatori VV-PML. Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv: temat. zb. nauk. pr. Donetsk: DonNUET. 2009; 20: 118-125.
10. Lavrinenko NM, Khomichuk VA, Beskrovnyi OI. Doslidzhennia i optymizatsiia yakosti zhyrovoi masy u plastyfikatori VV-PML. Visnyk Donetskoho natsionalnoho universytetu ekonomiky i torhivli imeni Mykhaila Tuhan-Baranovskoho. seriia Tekhnichni nauky. 2010; 1(45): 82-89.
11. Lavrinenko N, Beskrovnyy O. Kompiuterne modeliuvannia tekhni zhyrovoi masy u zmishuvachi plastyfikatora VV-PML. Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv: temat. zb. nauk. pr. Donetsk: DonNUET. 2009; 22: 254-262..
12. Lavrinenko N, Beskrovnyy O. Do pytannia optymizatsii formy lopatei plastyfikatora VV-PML. Visnyk Donetskoho natsionalnoho universytetu ekonomiky i torhivli imeni Mykhaila Tuhan-Baranovskoho. seriia Tekhnichni nauky. 2010; 1(45):S. 38-42.

Отримано в редакцію 10.01.2016

Прийнято до друку 19.04.2016