

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРШОЇ СТАДІЇ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ ДО СТАНУ РІВНОВАГИ

В.М. Михайлов, П.П. Гаврилко, І.Я. Стадник, О.М. Лясота

Наведено загальний аналіз результатів експериментальних досліджень із вивчення впливу параметрів та визначення їх ефективності як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів. Показано перехід термодинамічної системи з початкового нерівноважного стану до кінцевого рівноважного, який відповідає закінченню процесу змішування компонентів та в кінцевому випадку повинен включати енерговитрати на їх змішування в тісто заданої якості.

Ключові слова: система, термодинамічний потенціал, макромолекулярна структура, вологовміст, температура, міжфазова поверхня, міжфазова взаємодія.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОЙ СТАДИИ СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ К СОСТОЯНИЮ РАВНОВЕСИЯ

В.М. Михайлов, П.П. Гаврилко, И.Я. Стадник, О.М. Лясота

Приведен общий анализ результатов экспериментальных исследований по изучению влияния параметров и определения их эффективности как эволюции термодинамической системы к состоянию равновесия с использованием классического метода термодинамических потенциалов. Показано переход термодинамической системы из начального неравновесного состояния к конечному равновесному, который соответствует окончанию процесса смешивания компонентов и в конечном итоге должен включать энергозатраты на их смешивания в тесто заданного качества.

Ключевые слова: система, термодинамический потенциал, макромолекулярная структура, влагосодержание, температура, междофазная поверхность, междофазное взаимодействие.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS AT THE FIRST STAGE OF MIXING COMPONENTS BASED ON THERMODYNAMIC SYSTEM TO EQUILIBRIUM

V. Mykhailov, P. Gavrylko, I. Stadnyk, O. Lyasota

The process of mixing the ingredients that is predetermined by the properties of both flour and liquid components containing microorganisms (yeast, sour milk

bacteria, etc.) and active enzymes is studied. The main objective of efficient mechanical stirring is aimed at permanent maintenance of optimal temperature and structure formation to ensure the flow of nutrients to the cells of bacteria, and the required moisture- and gas-exchange. Selection and substantiation of rational constructions of a new direction of mixing without vanes, and mechanism of working bodies influence on the components remains a hot topic for research.

Based on the analysis of recent research and publications on this effective direction of kneading, the technique of solving complex forecasting results of basic technological operations of kneading stages, where the value of work or relevant energy wastes will be determined based on the method of system evolution. It is revealed that this method depends on functional relationship of some kind of thermodynamic parameters of the system. An overall analysis of experimental researches on the effect of parameters and determination of their effectiveness as the evolution of a thermodynamic system to the equilibrium state, using classical method of thermodynamic potentials. The transition of thermodynamic system from its initial nonequilibrium state to final equilibrium state, which corresponds to the completion of the process of mixing the components and generally must include energy losses for mixing into dough with the predetermined characteristics is shown.

Keywords: system, thermodynamic potential, macromolecular structure, moisture content, temperature, interphase surface, interphase reciprocity.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Специфіка процесів перемішування рецептурних сумішей і напівфабрикатів зумовлена як властивостями сипкого компонента – борошна, так і рідкими компонентами, що містять мікроорганізми (дріжджі, молочнокислі бактерії та ін.) й активні ферменти [1]. Характерною особливістю цієї групи сумішей є те, що тривалість їх змішування не перевищує 25 хв. За ударної та надмірно інтенсивної дії на таку суміш можна травмувати бактеріальну культуру й понизити активність її життєдіяльності. Крім раціональних механічних дій під час перемішування, необхідно підтримувати оптимальну температуру та структуроутворення. Така оптимізація повинна забезпечити приплив живильних речовин до клітин бактерій і необхідний волого- і газообмін. Тому вибір і обґрунтування раціональних конструкцій змішувачів і їх робочих сумішей і механізму дії на них робочих органів завжди залишається актуальною темою для винахідників.

Запропоновано новий ефективний напрям процесу змішування тіста. Цей напрям дає можливість реалізувати дискретна безлопатева тістомісильна машина, що належить до типу машин циклічної дії та може бути застосована в лініях невеликої продуктивності [2]. Ця технологія дозволяє значно підвищити ефективність виконання змішування тіста в умовах стаціонарної зміни рецептури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для змішування сипких продуктів в основному застосовують два способи –

гравітаційний і примусовий (механічний). Перший здійснюється під дією сили тяжіння в барабанних, лоткових, а другий – у шнекових, лопатевих і дискових робочих органах. Одночасний і взаємопов'язаний перебіг основних процесів є серйозним чинником, що ускладнює прогнозування результатів основних технологічних операцій стадійності замішування. Для кінетичних процесів характерною є мала швидкість переходу окремих макромолекулярних структур (а також іонів та радикалів) із твердої поверхні до рідини, що визначає граничну стадію процесу. У таких процесах на інтенсивність найбільше впливають: різниця потенціалів, ефективна площа поверхні частинок борошна, температура, фізико-хімічні властивості компонентів і об'єму всіх змішуваних компонентів у робочій камері машини.

Описана конструкція машини [3–5] забезпечує багатократне утворення та руйнування дисперсного потоку рідких компонентів на кожному кільцевому елементі місильної камери за зустрічного потоку газової фази (повітря). Така організація взаємодії фаз дозволяє підвищити ефективність проведення масообмінних процесів (рис. 1).

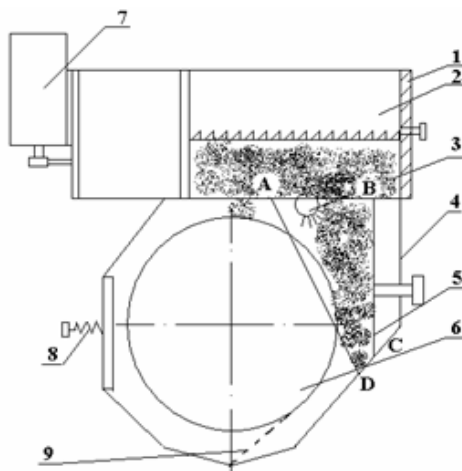


Рис. 1. Схема щільного зразка: 1 – вібратор борошна; 2 – борошно; 3 – нагнітальний пристрій рідких компонентів; 4 – місильна камера; 5 – регулятивний пристрій камери відпочинку; 6 – місильний орган; 7 – електродвигун постійного струму; 8 – регулятор консистенції; 9 – шибєр вивантаження тіста

Мета статті – виведення аналітичних залежностей шляху реалізації першої стадії змішування компонентів як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів на базі досліджень нової тістомісильної машини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ураховуючи цілий комплекс досліджень на безлопатевій машині [6], на основі процесу першої стадії змішування, запропоновано визначення її енергоефективності як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів. Це є переходом термодинамічної системи з початкового нерівноважного стану до кінцевого рівноважного, який відповідає закінченню процесу змішування компонентів.

У першому наближенні дозуючі рідкі компоненти та борошно можна розглядати як однокомпонентну двофазову термодинамічну систему. Рідкі компоненти, які знаходяться в замкнутому об'ємі багатогранної робочої камери машини, є рідинною фазою, другу тверду фазу складає борошно. При цьому обидві фази перебувають в одному сталому об'ємі з відповідною теплоємністю. Газова фаза (повітря) має нескінчений об'єм і, відповідно, теплоємність. Тому її параметри можна приймати постійними. Унаслідок такого процесу взаємодії компонентів подібну систему вважаємо ізольованою термодинамічною системою.

Утворена суміш рідких компонентів має відповідну функціональну залежність хімічного потенціалу. Він залежить від вологовмісту W і температури T за заданих відхилень параметрів рідинної фази (T_1, P_1, μ) від рівноважних значень. Як термодинамічний потенціал модельної системи виберемо енергію Гіббса або ізобарно-ізотермічний потенціал $G=U+PV-TS$. Процес переходу цієї системи до стану рівноваги необоротний і при цьому виконується умова для приросту потенціалу $dG < 0$. У стані рівноваги потенціал G матиме мінімальне значення для певних параметрів системи.

Відповідно до теорії термодинаміки зміна термодинамічного потенціалу системи рівна «роботі всіх узагальнених сил, що діють на систему». Різниця потенціалів між станами 1 (початок процесу змішування – гідратація) і 2 (утворення в'язкого пружного тіста) для процесу замішування фіксована, і визначається тільки початковими та кінцевими станами. Тому величини роботи або відповідні енергетичні витрати на змішування визначатимуться з огляду на спосіб, за яким здійснюється еволюція системи. Цей спосіб буде залежати від функціонального взаємозв'язку певного роду термодинамічних параметрів системи.

Вважаючи термодинамічні потенціали неперервними функціями своїх змінних і використовуючи рівність змішаних похідних функцій багатьох змінних, можна встановити важливі співвідношення між похідними термодинамічних змінних [7]. Так, використовуючи вільну енергію під час падіння компонентів, ми приймемо, що тиск відсутній.

На основі цих положень енергетичні витрати на процес першої стадії (перехід зі стану 1 у стан 2) можна записати у вигляді:

$$E = \int_1^2 dG.$$

З аналізу поведінки системи поблизу стану рівноваги з урахуванням роботи поверхневих сил на міжфазовій поверхні, вважаємо, що змінюється потенціал тільки першого стану. Таким чином рівняння для dG матиме вигляд:

$$dG = SdT - Vdp + md\mu - \Theta d\sigma,$$

де $d\Theta$ – площа міжфазової поверхні; $d\sigma$ – диференціал поверхневого натягу.

У нашому випадку для борошна фазовий контакт $S = 178 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$ можна вважати ідеальним. Рівняння має деяку множину варіантів для його реалізації. Це пов'язано з певним відхиленням величини, що входить у рівняння рівноважних значень, $dG = 0, dG > 0$.

Усі величини можуть знаходитися в різній функціональній залежності від параметрів реального термодинамічного процесу. Одним з основних параметрів першої стадії є вологовміст (кількість дозуючих рідких компонентів, w), що взаємодіє з борошном і його середньооб'ємною температурою T . У цьому разі T відіграє значну роль у процесі.

Виходячи з певних функціональних залежностей і на підставі рівняння, одержимо модельне рівняння:

$$dG(w, T) = S(w, T)dT - V(w)dp + m(w)d\mu(w, T) - \Theta(w)d\sigma(w, T).$$

Великий інтерес викликає диференціал $d\mu(w, T)$. За постійності інших параметрів системи, функція μ визначатиме умови

рівноваги системи в цілому. Ця залежність для борошна визначається за експериментальними даними та є функцією вигляду:

$$\mu(w, T) = K_{\mu} \cdot e^{-(K_w w + K_T T)},$$

де K_{μ} – коефіцієнт молекулярної дифузії рідких компонентів;
 K_T, K_w – коефіцієнти пропорційності.

У загальному вигляді

$$K_{\mu} \approx \frac{D p^2}{6 \tau_0} \cdot e^{-\frac{W}{K \cdot T}},$$

де τ_0 – середній період коливань молекули біля положення рівноваги;
 W – енергія активації (потенціальний бар'єр); K – постійна Больцмана;
 T – температура, К°; D_p – діаметр частинки твердого тіла. Для борошна першого гатунку $D_p \approx 0,15$ мм.

Порівняння теоретичних значень коефіцієнтів загалом показує інтенсифікацію замішування в умовах зважувального та тонкого шару, що відбувається на великій поверхні місильного барабана.

Аналіз чисельних експериментальних даних [6] дозволив установити загальну залежність між параметрами реального термодинамічного процесу тістоутворення. Слід зазначити, що величини отриманих параметрів є ефективними значеннями, що відображають кінетику складних хімічних реакцій, ускладнених процесами тепломасоперенесення. Вони можуть відрізнятися для кожного процесу залежно від властивостей борошна. Як показав аналіз процесу, ці дані величин збігаються з відомими літературними даними про процес тістоутворення. Усе це дозволяє використовувати відповідну функціональну залежність хімічного потенціалу для розрахунку їх впливу на отримання якісного тіста.

У співвідношенні модельного рівняння (1) є експериментальні дані для компонент s, m, μ, α та $d(\Theta = 4\pi \cdot (\frac{d}{2})^2)$, одержані в процесі змішування компонентів за період першої стадії тістоутворення (табл.).

$$dG(w, T) = S(w, T) dT + m(w) \cdot d\mu_w - \theta(w) \cdot d\alpha(w, T) \quad (1)$$

На основі даних проводимо апроксимацію складових і записуємо аналітичний вираз наближень:

$$S(w, T) = -27.95 - 0.06 \cdot w + 1.14T \quad (2)$$

$$\alpha(w, T) = -0.49 - 0.05 \cdot w + 0.035T \quad (3)$$

$$m(w) = 2.3 \cdot 10^{-4} + 4.6 \cdot 10^{-5} \cdot w \quad (4)$$

$$d(w) = (0.83 - 12.2 \cdot \frac{1}{w}) \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

$$\text{тоді } \Theta(w) = \pi(0.83 - \frac{12.2}{w})^2 \quad (6)$$

$$V(w) = \frac{\pi}{3} (0.83 - \frac{12.2}{w})^3 \quad (7)$$

$$\rho(w) = \frac{m(w)}{v(w)}. \quad (8)$$

Таблиця

Експериментальні дані першої стадії тістоутворення

| W | T | S | M | α | μ | d (мм) |
|----|------|-----|--------|----------|------------------|--------|
| 20 | 26 | 0,8 | 0,001 | 0,3 | $1,2 \cdot 10^3$ | 0,15 |
| 21 | 26,5 | 0,9 | 0,0012 | 0,31 | $1,3 \cdot 10^3$ | 0,21 |
| 22 | 27 | 1 | 0,0012 | 0,33 | $1,4 \cdot 10^3$ | 0,3 |
| 23 | 27 | 1,1 | 0,0014 | 0,38 | $1,8 \cdot 10^3$ | 0,32 |
| 25 | 27,5 | 2,1 | 0,0015 | 0,37 | $1,9 \cdot 10^3$ | 0,4 |
| 30 | 28 | 2,9 | 0,0016 | 0,32 | $2 \cdot 10^3$ | 0,45 |
| 40 | 29 | 2,4 | 0,0020 | 0,29 | $2,1 \cdot 10^3$ | 0,45 |
| 60 | 30 | 2,5 | 0,003 | 0,27 | $2,2 \cdot 10^3$ | 0,5 |

Якщо $d = 0,2$ мм, то має місце наближення (5), а отже, і (6–7).

У будь-якому разі:

$$\rho(w) = \frac{2.3 \cdot 10^{-4} + 4.6 \cdot 10^{-5} \cdot w}{\frac{\pi}{3} (0.83 - \frac{12.2}{w})^3} - \text{густина.} \quad (9)$$

Знайдемо w із (5), за якого $d = 0,2$ мм, розв'язавши рівняння:

$$0,2 \cdot 10^{-3} = 0,83 - \frac{12,2}{\omega}.$$

Одержали, що $w = 14,7$ – нижнє допустиме граничне значення режиму $w(T)$.

Маємо також:

$$\mu(w, T) = -1,2 \cdot 10^{-4} - 25,28 \cdot w + 507,51T \quad (10)$$

Наведені дані досліджень дають обмеження та аналітичний зв'язок:

$$-157,8 + 1,7 T^{1,41} \leq w(T) \leq -166,1 + 2,3 T^{1,35} \quad (11)$$

Тоді для dw має місце

$$2,4 T^{0,41} dT \leq dw \leq 3,1 T^{0,35} \cdot dT, \text{ для } w - (20; 60).$$

Диференціал $\mu(w, T)$ шукаємо як:

$$d\mu = \mu'_w \cdot dw + \mu'_T \cdot dT,$$

$$d\mu \leq -25,28 \cdot 3,1 \cdot T^{0,35} \cdot dT + 507,51 dT \geq (-78,37 \cdot T^{0,35} + 507,51) dT \quad (12)$$

У подальшому будемо використовувати рівність у правій частині (11), приймаючи оцінку $w(T)$ як граничне значення оптимального режиму зміни $w(T)$.

Аналогічно для $\alpha(w, T)$ маємо:

$$d\alpha = \alpha'_w \cdot dw + \alpha'_T dT,$$

$$d\alpha \leq -0,005 \cdot 3,1 T^{0,35} dT + 0,035 dT \geq (-0,0155 T^{0,35} + 0,035) dT \quad (13)$$

Підставляємо в (1)

$$S(w, T) = S(T) = (-139,18 + 9,54T - 0,16T^2),$$

$$m(w, T) = 2.3 \cdot 10^{-4} + 4.6 \cdot 10^{-5}(-1.66 + 2.3T^{1.35}) = -1.44 \cdot 10^{-3} + 1.06 \cdot 10^{-4}T^{1.35}$$

$$\Theta(w) = \Theta(T) = \pi(0.83 - \frac{12.2}{-66.1 + 2.3T^{1.35}}) = \frac{\pi}{10^6} (0.83 + \frac{12.2}{2.3T^{1.35} - 166.1})^2 \cdot$$

Отримуємо звичайне диференційоване рівняння відносно змінної T .

$$dG = G'_w \cdot dw + G'_T \cdot dT$$

$$G'_w = G'_T \frac{dT}{dw} = G'_T \frac{1}{w'_T} = G'_T \frac{1}{3.1T^{0.35}} dT$$

$$dG = G'_T (\frac{1}{3.1T^{0.35}} + 1) dT$$

$$G'_T (\frac{1}{3.1T^{0.35}} + 1) - 139.18 + 9.54T - 0.16T^2 + \\ + (1.06 \cdot 10^{-4} T^{1.35} - 7.41 \cdot 10^{-3}) - \frac{\pi}{10^6} (0.83 + \frac{12.2}{2.3T^{1.35} - 166.1})^2 \\ \cdot (0.035 - 0.016T^{0.35})$$

Швидкість зміни $G(w, T)$ характеризується:

$$G'_T = \frac{3.1T^{0.35}}{3.1T^{0.35} + 1} \left[(-139.18 + 9.54T - 0.16T^2) + (1.06 \cdot 10^{-4} T^{1.35} - \right. \\ \left. - 7.41 \cdot 10^{-3})(507.51 - 78.37T^{0.35}) - \frac{\pi}{10^6} (0.83 + \frac{12.2}{2.3T^{1.35} - 166.1})^2 \right. \\ \left. \cdot (0.035 - 0.016T^{0.35}) \right]$$

G шукаємо як $\int G'_T dT$, тут $G_T = 0.2 \text{ м}^2$.

Рішення рівняння (14), яке обґрунтовує зміну потенціалу другою методикою

$$dG(w, T) = S(w, T) \cdot dT + m(w) d\mu(w, T) - \Theta(w) d\alpha(w, T) \quad (14)$$

дозволяє одержати вираз:

$$G(w) = \int_{20}^w \sin dw \cdot$$

Дослідження показали, що підвищення інтенсивності змішування компонентів відбудеться без збільшення затрат енергії, оскільки з підвищенням швидкості потоку зменшуються його поперечні розміри, а отже, і маса компонентів на ділянці «змішування». Потік отримує підвищену швидкість у вигляді тонкого шару, тому поверхня фазового контакту між компонентами суміші є достатньою для отримання необхідної однорідності суміші тільки за рахунок гідротакційної активності інгредієнтів. Інтегрування функції $dG(w,T)$ у заданих межах по w та T дає величину енерговитрат на процес тістоутворення для певного варіанта відхилення параметрів системи від рівноважних значень. Мінімальне значення інтеграла буде вказувати шлях реалізації процесу з найвищою енергоефективністю.

На рис. 2 і 3 показано тривимірний графік та діаграму функції $G(ww, t)$, що характеризує залежність зміни питомих сил взаємодії від вологості ww і температури T з урахуванням залежності для $d\sigma(w,T)$, та рівноважну криву $G(t)$ процесу першої стадії.

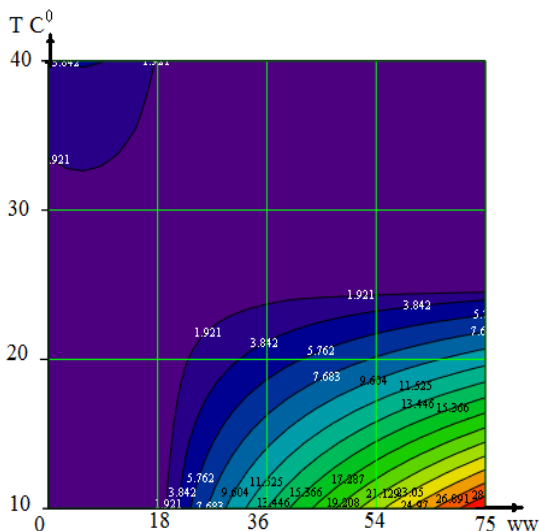


Рис. 2. Діаграми питомих сил взаємодії поверхневих шарів відносно вологості ww та температури T

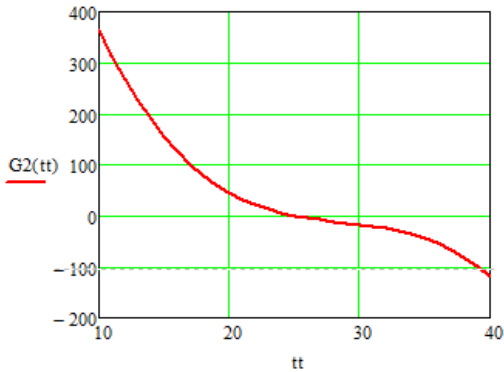


Рис. 3. Залежність питомих сил взаємодії від температури

Висновки. У новій тістомісильній машині дисперсність першої стадії змішування досягається в результаті вільного падіння компонентів і механічної дії місильного барабана за встановленого режиму дозування згідно з рецептурою. Тому процес утворення рідкої суміші компонентів розглядається разом із процесом дозування, який зміщений в часі та набуває плавного неперервного характеру. Запропонований метод аналізу термодинамічної системи до стану рівноваги з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів у процесі тістоутворення дозволяє проводити не тільки експертну оцінку якості тіста на стадії його утворення, але й розробляти раціональні режими його обробки шляхом цілеспрямованої зміни процесних і технологічних чинників.

Список джерел інформації / References

1. Амирасланова Н. И. Влияние длительности интенсивного замеса жидкой опары на кинетику брожения / Н. И. Амирасланова, С. И. Сидоренко, А. Т. Лисовенко // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1987. – № 3. – С. 35–37.

Amiraslanova, N.I., Sidorenko, S.I., Lisovenko, A.T. (1987), “The influence of the duration of intensive kneading of liquid sponge of fermentation kinetics” [“Vlyuanye dlytel'nosti yntensyvnoho zamesa zhydkoy opary na kynytyku brozhenyya”], *Baking and confectionary industry*, No. 3, pp. 35-37.

2. Пат. 62460 А Україна. Тістомісильна машина / О. Т. Лісовенко, І. О. Лісовенко, І. Я. Стадник. – Заявл. 27.03.03 ; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12. – 2 с.

Lisovenko, O.T., Lisovenko, I.O., Stadnyk, I.Ya. (2003), *Kneading machine*, Pat. 62460 A Ukraine.

3. Лісовенко О. Т. Новий спосіб замішування тіста / О. Т. Лісовенко, І. Я. Стадник // Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодні та перспективи : наук.-практ. конф. – К. : НУХТ, 2010. – № 10. – С. 28.

Lisovenko, O.T., Stadnyk, I.Ya. (2010), “New method of kneading dough” [“Novyy sposib zamishuvannya tista”], *Scientific-practical conference “New technologies, equipment, safety and quality of products: modernity and perspectives”*, NUFT, Kiev, No. 10, p. 28.

4. Добротвор І. Г. Дослідження розподілу концентрацій розчинних шарів при змішуванні / І. Г. Добротвор, І. Я. Стадник // *Хранение и переработка зерна*. – 2011. – № 8. – С. 48–50.

Dobrotvor, I.G., Stadnyk, I.Ya. (2011), “Studying division of soluble layers concentrations in the process of mixing” [“Doslidzhennya rozpodilu kontsentratsiy rozchynnykh shariv pry zmishuvanni”], *Storage and processing of grain*, No. 8, pp. 48-50.

5. Стадник І. Я. Процеси першої стадії замішування на новій тістомісильній машині / І. Я. Стадник // *Вісник ТДТУ*. – 2009. – № 2, т. 14. – С. 72–79.

Stadnyk, I.Ya. (2009), “Processes of the first stage of kneading in a new kneading machine” [“Protseyi pershoi stadiyi zamishuvannya na noviy tistomisyl'niy mashyni”], *Visnyk TSTU*, No. 2, Vol. 14, pp. 72-79.

6. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста : автореф. дис. ... д-р техн. наук / І. Я. Стадник. – 2013. – 40 с.

Stadnyk, I.Ya. (2013), *Scientific and technical background for the processes and elaboration of the equipment for mixing dough without vanes: Autor's thesis* [Naukovo-tekhnichni osnovy protsesiv ta rozrobka obladnannya dlya bezlopatyevoho zamishuvannya tista: avtoref. dis. ... tech. nauk], 40 p.

7. Касадрова О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Касадрова, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 104 с.

Kasadrova, O.N., Lebedev, V.V. (1970), *Processing of the results of the observations* [Obrabotka rezul'tatov nablyudenyi], Nauka, Moscow, 104 p.

Михайлов Валерій Михайлович, д-р техн. наук, проф., кафедра процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. E-mail: mychailov@kharkov.com.

Михайлов Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф., кафедра процессов, аппаратов и автоматизации пищевых производств, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. E-mail: mychailov@kharkov.com.

Mykhailov Valeriy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Processes, apparatus and automation of food productions, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. E-mail: mychailov@kharkov.com.

Гаврилко Петро Петрович, канд. екон. наук, проф., директор Ужгородського торговельно-економічного інститут КНТЕУ. Адреса: вул. Коритнянська, 4, м. Ужгород, Україна, 88020.

Гаврилко Петр Петрович, канд. экон. наук, проф., директор Ужгородского торгово-экономического института КНТЭУ. Адрес: ул. Коритнянская, 4, г. Ужгород, Украина, 88020.

Gavrylko Petro, candidate of economic sciences, prof., director of Uzhgorod Trade and Economic Institute of KNTEU. Address: Korytyanska st., 4, Uzhgorod, Ukraine, 88020.

Стадник Игор Ярославович, д-р техн. наук, проф., кафедра обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. Адреса: вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001.

Стадник Игорь Ярославович, д-р техн. наук, проф., кафедра обладнання пищевых технологий, Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя. Адрес: ул. Русская, 56, г. Тернополь, Украина, 46001.

Stadnyk Igor, Dr. of technical sciences, prof., department of food technologies equipment, Ivan Pulyui Ternopil National Technical University. Address: Ruska str., 56, Ternopil, Ukraine, 46001.

Лясота Оксана Михайлівна, канд. техн. наук, доц., кафедра обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. Адреса: вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001.

Лясота Оксана Михайловна, канд. техн. наук, доц., кафедра обладнання пищевых технологий, Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя. Адрес: ул. Русская, 56, г. Тернополь, Украина, 46001.

Lyasota Oksana, candidate of technical sciences, associate professor, department of food technologies equipment, Ivan Pulyui Ternopil National Technical University. Address: Ruska str., 56, Ternopil, Ukraine, 46001.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. О.Г. Терешкіним.
Отримано 15.10.2016. ХДУХТ, Харків.*

УДК 641.5

СИСТЕМНО-ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ АПАРАТА АРЖМ-0.07-1

В.О. Потапов, С.М. Костенко

Шляхом системно-динамічного моделювання виконано комплексну оцінку апарата з рефлектором для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1. Аналіз продуктивності, енергоємності,