Хацкевич Юрій Миколайович, канд. техн. наук, доц., кафедра товарознавства та експертизи товарів, Харківський державний університет харчування та торгівлі. вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. E-mail: tovaroved206@ukr.net.

Хацкевич Юрий Николаевич, канд. техн. наук, доц., кафедра товароведения и экспертизы товаров, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. E-mail: tovaroved206@ukr.net.

Hackevich Yuri, Ass. Prof, sci. degree: Cand in TechSciD, Ass. Prof., Department of Merchandising and Goods Expertize, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. E-mail: tovaroved206@ukr.net.

Виродова Оксана Володимирівна, асист. кафедри товарознавства та експертизи товарів, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. E-mail: tovaroved206@ukr.net.

Выродова Оксана Владимировна, ассист. кафедры товароведения и экспертизы товаров, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. E-mail: tovaroved206@ukr.net.

Vyrodova Oksana, Postgraduate, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. E-mail: tovaroved206@ukr.net.

Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. Г.В. Дейниченком.
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.

УДК 519.876.5: 664

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

М.І. Погожих, В.В. Сєдунова, М.А. Чеканов

Розглянуто проблему визначення енергоефективності енерготехнологічних процесів, що ідентифікуються як термодинамічна система. Вибрано і обґрунтувано фізико-математичні методи моделювання та аналізу енерготехнологічних процесів харчових виробництв для оцінювання їх ефективності. Фізичний аналіз стану термодинамічної системи на основі законів збереження, другого закону термодинаміки з використанням *термодинамічних потенціалів та застосуванням методів математичного аналізу і надання цим методам фізичного сенсу, що дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність того чи іншого енерготехнологічного процесу.*

Ключові слова: *енергоефективність, термодинамічна система, фізичні властивості, енерготехнологічний процес, математичне моделювання, потенціал Гіббса.*

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Н.И. Погожих, В.В. Седунова, Н.А. Чеканов

Рассмотрена проблема определения энергоэффективности энерготехнологических процессов, которые идентифицируются, как термодинамическая система. Выбраны и обоснованы физико-математические методы моделирования и анализа энерготехнологических процессов пищевых производств для оценки их эффективности. Физический анализ состояния термодинамической системы на основе законов сохранения, второго закона термодинамики с использованием термодинамических потенциалов и применением методов математического анализа и предоставления этим методам физического смысла, что позволяет объективно оценивать эффективность того или иного энерготехнологического процесса.

Ключевые слова: *энергоэффективнисть, термодинамическая система, физические свойства, энерготехнологический процесс, математическое моделирование, потенциал Гиббса.*

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFICIENCY OF ENERGY TECHNOLOGY PROCESSES

M. Pogozhikh, V. Sedunova, M. Chekanov

The article is about the problem of determining the energy of power technology processes that are identified as a thermodynamic system. We made the selection and justification of physical and mathematical modeling techniques and analysis of process power technology of food production to assess their effectiveness. Physical analysis of the thermodynamic system is based on the laws of conservation, second law of thermodynamics using thermodynamic potentials and application of mathematical analysis and methods for providing this physical sense, which can objectively evaluate the effectiveness of a process in Energy. It is known that the physical properties of the approach to equilibrium is asymptotic values. So, the application of mathematical analysis and methods of providing this physical sense, will objectively evaluate the effectiveness of a process in Energy. It should be noted that if the process can be identified in Energy thermodynamic system, its *evolution , development status can be analyzed on the basis of the laws of conservation, second law of thermodynamics and can be used the thermodynamic potentials. As an example of physical and mathematical models consider the process of heating the body. The process of heat was taken because it is common in the technology of food production. According to the definition of "heat" and "temperature" temperature always tends to equilibrium for any thermodynamic systems that are in thermal contact. To test these assumptions experiments were conducted with heat-known body mass and specific heat conductive and convective methods. As an example used an aluminum cylinder with a known mass and heat capacity. The experiment was considered complete withdrawal subject to fixed mode.*

Keywords: *enerhoefetyvnist, thermodynamic system, physical properties, process power technology, mathematical modeling, the potential for Gibbs.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Досить жорстка конкуренція на ринку харчових продуктів призводить до необхідності постійного вдосконалення технологій, технологічних ліній, апаратів для харчових виробництв. Крім того загальносвітовою тенденцією є раціональне використання енергетичних ресурсів та забезпечення екологічних вимог. Останнє зумовлено тим, що вчені-кліматологи відзначають зростаючий антропогенний фактор, що впливає на зміну клімату та локальних кліматичних катаклізмів. При цьому наголошується, що не лише факт технологічної діяльності людини є складовою екологічної та енергетичної проблеми, але й відсутність ефективного науково обґрунтованого прогнозування аналізу енерготехнологічних процесів.

У зв'язку з цим розвиток фізико-математичних методів моделювання ефективності енерготехнологічних процесів слід вважати актуальною науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізичною основою методу є той факт що переважна частина технологічних процесів має загальну характерну рису: тривалість процесів обмежують моментом, коли одна або кілька фізичних властивостей або параметрів предмета процесу отримують рівноважні значення величини, тобто наближаються до технологічно заданих, або відповідним значенням зовнішнього середовища (машини, апарату, вузла, середовища)

Відомо, що наближення фізичних властивостей до рівноважних величин є асимптотичним (зверху або знизу). Таким чином, застосування методів математичного аналізу та надання їм фізичного сенсу дозволить об'єктивно оцінювати ефективність того чи іншого енерготехнологічного процесу. Слід зазначити, що якщо в енерготехнологічному процесі можна ідентифікувати термодинамічну систему, то її еволюцію (розвиток, стан) можна аналізувати на основі законів збереження, другого закону термодинаміки та використовувати термодинамічні потенціали [1; 2].

Метою статті є вибір і обґрунтування фізико-математичних методів моделювання та аналізу енерготехнологічних процесів харчових виробництв для оцінювання їх ефективності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Термодинамічний потенціал Гіббса, що найчастіше використовується в подібних випадках, описується рівнянням:

$$Z = U + PV - TS \tag{1}$$

$$Z^*(T,P,S,V) = U(S,V) + \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V=const} \times \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_{V=const} - \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{V=const} \times$$

$$\times \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_{V=const}, \tag{2}$$

де Z із часом прагне до мінімуму, а dZ^* – до нуля.

Розглянемо тепер позитивну функцію:

$$Asm(P,T) = Asm(P(V,t),T(V,t)) = Asm(V,t), \tag{3}$$

де P – тиск, T – температура, V – об’єм (у спрощеному випадку – x, просторова координата), t – час.

На початку *Asm (P,T)* не містить часу, але кожна з її змінних змінює свій стан з часом, тому значення функції також змінюється (можемо подати ці зміни як послідовність різних станів).

Будемо розглядати *Asm (V,t)* за деякого фіксованого значення V. У момент часу $t = 0; Asm(V,t) = A_V$, при $t \to \infty, \forall V : Asm(V,t) \to 0$. Крім того, для будь-якого V зобов’яжемо, щоб *Asm (V,t)* була інтегровна на $[0;+\infty)$ по t.

Мається на увазі, що деяка властивість системи виконується *майже всюди* на деякій підмножині числової прямої, якщо вона виконується обов’язково, крім, можливо, деякої множини з нульовою мірою Лебега. (Для відрізка або інтервалу на прямій міра Лебега дорівнює його довжині; для квадрата та інших областей на площині – їхній площі. Множина з нульовою мірою Лебега – це кінцева або розрахункова множина точок).

Відповідно до теореми Лебега, неперервну майже всюди на деякому кінцевому інтервалі (або області) функцію можна інтегрувати на цьому інтервалі/області [3].

Далі визначимо інтеграл за нескінченним інтервалом $[0;+\infty)$. Якщо функція *Asm (V,t)* неперервна майже всюди на будь-якому відрізку *[0;B]*, і $\exists lim_{t\to\infty}\int_0^B Asm(V,t)dt = I$, то функцію можна інтегрувати $Asm(V,t)$ на $[0;+\infty)$ і $I = \int_0^{+\infty}(f(t)dt$. $Asm(V,t)$ можна записати у вигляді добутку $Asm(V,t) = \sigma(V,t)\times\varphi(V,t)$. При цьому, якщо σ і φ залежать від різного набору параметрів (у цьому разі – просторових координат), наприклад $\sigma(x,z,t)\times\varphi(y,t)$, ми завжди можемо доповнити їх до загального набору, поклавши:

$$\sigma(x,z,t) = \sigma(x,z,t) + 0\times y = \sigma^*(V,T);$$
$$\varphi(y,t) = \varphi(y,t) + 0\times(x+z) = \varphi^*(V,t). \qquad (4)$$

<u>Лема 1.</u> Неперервна майже всюди невід'ємна на $[0;+\infty)$ функція $f(t)$ асимптотично прямує до нуля при $t\to+\infty$ тоді й тільки тоді, коли $\exists$ монотонно незростаюча і строго позитивна майже всюди функція $g(t)$, неперервна майже всюди на $[0;+\infty)$ й така, що:

$$t\to+\infty, g(t)\to 0; \forall t\in[0;+\infty): f(t)\le g(t). \qquad (5)$$

<u>Доведення</u>. Якщо існує обмежена функція, що не зростає $g(t)$, то пряма $y=0$ є асимптотою для $f(t)$ $0\le lim_{t\to\infty} f(t)\le lim_{t\to\infty} g(t)=0$. Навпаки, якщо $lim_{t\to\infty} f(t)=0$, тоді виконується:

$$\forall\varepsilon>0\exists t_\varepsilon \text{ таке, що } \forall t>t_\varepsilon \left|f(t)\right|<\varepsilon. \qquad (6)$$

Отже, $f(t)$ обмежено деяким числом ε на кожному відрізку $[t_\varepsilon;+\infty)$.

Побудуємо функцію $g(t)$ у такий спосіб, щоб $g(t) = max_{\tau\ge t} f(\tau)$. Тоді $g(t)$ – монотонна функція, незростаюча та неперервна майже всюди на $[0;+\infty)$, і така, що обмежує $f(t)$ зверху. При цьому зарівнянням (5), $g(t) \to 0$ при $t \to \infty$. Лема доведена.

Таким чином, для функції, що $Asm(V,t)$ завжди можна вказати функцію, яка монотонно не зростає, та яку можна інтегрувати $[0;+\infty)$ функцією, що обмежує її зверху.

Далі розглянемо множники $\sigma(V,t), \varphi(V,t)$. Вони є невід'ємними, інтегровані на $[0;+\infty)$, неперервні майже всюди й мають не більш ніж злічене число екстремумів. Хоча б один із них (на приклад, це буде $\sigma(V,t)$ асимптотично прямує до нуля.

З урахуванням доведеної вище леми 1 існує монотонна функція, що не зростає та обмежує $\sigma(V,t)$ зверху, неперервна майже всюди на $[0;+\infty)$ та прямує до 0 при $t \to \infty$.

<u>Лема 2</u>. Другий співмножник $\varphi(V,t)$ може бути:

1) const, яка не залежить від t, стаціонарні процеси;

2) обмеженою функцією, що змінюється в межах: $\varphi(V,t) \in [A_1; A_2]$, де $0 < A_1 < A_2$. У цьому разі $lim_{t \to \infty} \varphi(t)$ не існує;

3) функція необмежено зростає на $[0;+\infty)$, неперервна майже всюди на будь-якому кінцевому відрізку $[0;B]$. При цьому повинна існувати монотонна неспадаюча функція $h(t)$, інтегровна на $[0;+\infty)$ і така, що обмежує $\varphi(V,t)$ і задовольняє умову:

$$h(t)g(t) = O\left(\frac{1}{(t+1)^{1+\mu}}\right), \mu > 0, \qquad (7)$$

де $g(t)$ – монотонно незростаюча функція , що обмежує $\sigma(V,t)$.

<u>Доведення</u>. Нам необхідно, щоб $Asm(V,t)$ була інтегрована на $[0;+\infty)$ і прагнула до 0 при $t \to \infty$. У випадках:

1) $\varphi(V,t) = C$, тоді $0 < Asm(V,t) = \sigma(V,t)\varphi(V,t) \le Cg(t)$ – умови виконуються з урахуванням леми 1 і властивостей інтегрованих функцій.

2) $A_1 \le \varphi(V,t) \le A_2$, тоді $0 < Asm(V,t) = \sigma(V,t)\varphi(V,t) \le A_2 g(t)$ аналогічно випадку 1);

3) $\varphi(V,t) \le h(t)$, тоді:

$$0 < Asm(V,t) = \sigma(V,t)\varphi(V,t) \le g(t)h(t) = O\left(\frac{1}{(t+1)^{1+\mu}}\right). \quad (8)$$

Оскільки $\int\limits_0^{+\infty} \frac{Cdt}{(t+1)^{1+\mu}} = C$, то $Asm(V,t)$ є інтегрованою на $[0;+\infty)$ та

$$0 \le \lim_{t\to+\infty} \sigma(V,t)\varphi(V,t) \le \lim_{t\to+\infty} g(t)h(t) = \lim_{t\to+\infty} \frac{c}{(t+1)^{1+\mu}} = 0\,. \quad (9)$$

Лему доведено.

Отже, $Asm(V,t)$ може бути представлена у вигляді добутку двох функцій $\sigma(V,t)\varphi(V,t)$, де $\sigma(V,t)$, що задовольняє умови леми 1, і, отже, обмежена зверху монотонною незростаючою функцією $g(t)$, інтегрованою на $[0;+\infty)$, неперервною майже всюди; а $\varphi(V,t)$ – умови леми 2 і обмежена зверху константою або монотонною функцією $h(t)$, що не зменшується, неперервною майже всюди на $[0;+\infty)$.

Клас функцій, що можна розглядати як множники для $Asm(V,t)$, досить широкий. До нього належать зокрема неперервні, неперервні майже всюди, функції, що диференціюються майже всюди, монотонні функції; функції, що диференціюються k раз та ін. [4].

У випадку, якщо $Asm(V,t)$ є багатозначною функцією (що зумовлено особливостями фізичної задачі, пов'язаної з нею), розглядаємо окремо кожну ланку $\Sigma(V,t)$ й $\Phi(V,t)$. Для кожної пари $\sigma(V,t) = \Sigma_\alpha(V,t), \varphi(V,t) = \Phi_\beta(V,t)$ викладене вище правильно. Або ж можемо розглянути точну верхню грань (нижню грань) множини всіх можливих значень $\Sigma(V,t)$ і $\Phi(V,t)$, якщо вони існують. Тут варто помітити, що межею послідовності неперервних майже всюди функцій є функція також неперервна майже всюди на $[0;+\infty)$, відповідно:

$$S\Sigma(V,t) = sup_a \sum{}_a(V,t) = lim_{k\to\infty} \sum{}_{a_k}(V,t); \quad (10)$$

$$S\Phi(V,t) = sup_\beta \Phi_\beta(V,t) = lim_{k\to\infty} \Phi_{\beta_k}(V,t). \quad (11)$$

Розглянемо тепер випадок, коли $\sigma(x_1,x_2,..x_n,t)$ і $\varphi(y_1,y_2,..y_m,t)$ є функціями декількох змінних. Можна вважати, що кількість змінних $x_1,x_2,..x_n$ і $y_1,y_2,..y_m$ збігаються, оскільки відсутні, то їх можна просто додати з нульовими коефіцієнтами. Отже:

$$Asm(x_1,x_2,..x_n,t)=\sigma(x_1,x_2,..x_n,t)\varphi(x_1,x_2,..x_n,t),$$
$$(x_1,x_2,..x_n,t)\in R^{n+1} \tag{12}$$

Носій функції K – замикання підмножини R^{n+1} , на якому функція не дорівнює 0. Якщо K_1 й K_2 – носії $\sigma(x_1,x_2,..x_n,t)$ і $\varphi(x_1,x_2,..x_n,t)$, то носій K функції $Asm(x_1,x_2,..x_n,t)$ є замиканням їхнього перетину $K=\overline{K_1\cap K_2}$.

$Asm(x_1,x_2,..x_n,t)$ повинна бути невід'ємною, вимірною на K .

Вимоги для співмножників:

1) $\sigma(x_1,x_2,..x_n,t)$ – невід'ємна, вимірна на K_1, обмежена майже всюди. Може містити не більше, ніж зчислену кількість розривів 1 роду. Якщо K_1 містить точку ∞, то $\sigma(x_1,x_2,..x_n,t)\to 0$, якщо $x=(x_1,x_2,..x_n,t)\to\infty$, незалежно від того, яким саме шляхом ми прямує до ∞ Може бути обмежена зверху гладкою поверхнею $S(x_1,x_2,..x_n,t)$, такою, що $S(x_1,x_2,..x_n,t)\to 0$ при $x\to\infty$ у будь якому випадку.

2) $\varphi(x_1,x_2,..x_n,t)$– невід'ємна, вимірна на будь-якій обмеженій множині $\mathrm{E}\subset\mathrm{R}^{n+1}$. Може містити не більше, ніж зчислене число розривів 1 роду. Може не прямувати до 0, бути константою або взагалі необмежено зростати при $x\to\infty$. Проте порядок її зростання по тій самій змінній не повинен перевищувати порядок спадання по тій самій змінній функції $\sigma(x_1,x_2,..x_n,t)$, за інших фіксованих змінних, з урахуванням леми 2, повинне виконуватися:

$$\sigma(c_1,...,x_i,...c_n,c)\varphi(d_1,...,x_k,...d_n,d)=O\left(\frac{1}{(x_k+1)^{1+\mu}}\right) \tag{13}$$

Далі, якщо хоча б в одного зі співмножників носій обмежений, то й K обмежений також. Тоді можна знайти такий $n+1$ – мірний відрізок $[a;b]$, що $K \subseteq [a;b]$. Відповідно до теореми Лузіна, для $Asm(x_1,x_2,..x_n,t)$, вимірної на відрізку $[a;b]$, може бути знайдена неперервна функція, що збігається з $Asm(x_1,x_2,..x_n,t)$ на множині, що мало відрізняється від $[a;b]$:

$$\forall \varepsilon > 0, \exists A_\varepsilon(x) \in C([a;b]) : \mu\{x \in [a;b] : A_\varepsilon(x) \neq Asm(x)\} < \varepsilon \qquad (14)$$

Тобто, можна вказати послідовність неперервних на $[a;b]$ функцій, що сходяться до $Asm(x)$ принаймні:

$$\lim_{n\to\infty} \|Asm(x) - A_n(x)\| = \lim_{n\to\infty} \int_{[a;b]} |Asm(x) - A_n(x)| dx = 0 \qquad (15)$$

При цьому сама Asm(x) може бути розривною.

Таким чином, якщо носій K обмежений, то завжди можна провести розрахунки із задовільною для нас точністю $\varepsilon > 0$, для деякої неперервної функції $A_\varepsilon(x)$, що співпадає з $Asm(x)$ на множині мірою $\mu([a;b]) - \varepsilon$.

Окремо розглянемо випадок, коли змінна t скорочується, параметричний випадок, при добутку, тобто $Asm(x_1,x_2,..x_n) = \sigma(x_1,x_2,..x_n,t)\varphi(x_1,x_2,..x_n,t)$.

Тоді $Asm(x_1,x_2,..x_n)$ задає деяку гіперплощину в $(n+1)$ – мірному просторі, що відображає залежність між змінними $(x_1,x_2,..x_n)$. Ця залежність у будь-який момент часу постійна.

Нехай тепер функція $Asm(P,t)$ спадає та описує деякий процес (спочатку розглядаємо функцію від однієї змінної, P – параметр), при $t \to \infty : Asm(P,t) \to 0$. Фізичний процес у якийсь момент часу закінчиться, тому вибираємо точку B, у якій $f(B) < \varepsilon$ (заздалегідь обраного малого значення, наприклад $\varepsilon = 0.001$), і вважаємо її межею, за якою процес буде завершений. Тоді вся енергія, витрачена на процес, $Q = \int_0^B Asm(P,t)dt$.

Розглянемо величину $IA = \frac{1}{B}\int_0^B Asm(P,t)dt$ – середнє значення функції на $[0;B]$. Відповідно до теореми про середнє, що існує точка

C, у якій $IA = Asm(P,C)$. Припустимо, що енергоефективність процесу тим вища, чимближче точка C перебуває до точки B, тобто чим менша величина $\xi = \frac{B-C}{C}$. Величина ξ інваріантна щодо нормування функції. Якщо $Asm1(P,t) = \frac{Asm(P,t)}{IA}$, то $IA1 = \int_0^B Asm1(P,t)dt = 1$, точки B і C зберігають те саме положення і $\xi 1 = \xi$. Якщо $Asm2(P,t) = \frac{Asm(P,Bt)}{IA}$, то $IA2 = \int_0^B Asm2(P,t)dt = \frac{1}{B}$.

Тоді:

$$B2 = 1, C2 = \frac{C}{B} \text{ і } \xi 1 = \frac{1-C2}{C2} = \frac{1-\frac{C}{B}}{\frac{C}{B}} = \xi . \tag{16}$$

Другий спосіб нормування дозволяє розглянути будь-який процес на відрізку $[0;1]$ (відображає $Asm(P,t)$ на одиничну сферу); при цьому величина ξ, що характеризує енергоефективність процесу, зберігає своє значення. Таким чином, можемо провести порівняльний аналіз декількох процесів (або того самого, за різних значеннь параметра P) і встановити, який з них є найбільш енергоефективним.

Для приклада розглянемо процеси, що можна описати експонентами $f1(t) = e^{-t}, f2(t) = e^{-t^2}$ із зворотною функцією $f3(t) = \frac{1}{t}$. Знайдемо для кожного процесу величину $B_i : fi(B_i) = \frac{1}{1000} fi(0), i = 1..3$ і розглянемо $fBi(t) = fi(B_i t)$. Тоді $fBi(1) = \frac{1}{1000} fi(0), i = 1..3$.

Припустимо $f1i(t) = \frac{fBi(t)}{\int_0^1 fBi(t)dt}$, тоді $\int_0^1 f1i(t)dt = 1, i = 1..3$.

На рис. 1 наведено порівняльні залежності нормованих функцій. Відповідно значення точок $C3 = 0.145, C1 = 0.28, C2 = 0.397$.

Узагалі, чим вищий ступінь k для функції $f(k,t) = e^{-t^k}$, тим ближче точка C до точки B. На рис. 2 наведено нормовані залежності

$f(k,t)$ для різних k. На них можна побачити, що для $e^{-t^{10}}$ – точка $C \approx 0.716$.

Для великих (порядку $50,100$) значень k нормована функція $f(k,t) = e^{-t^k}$ прямує за формою до одиниці, рис. 3.

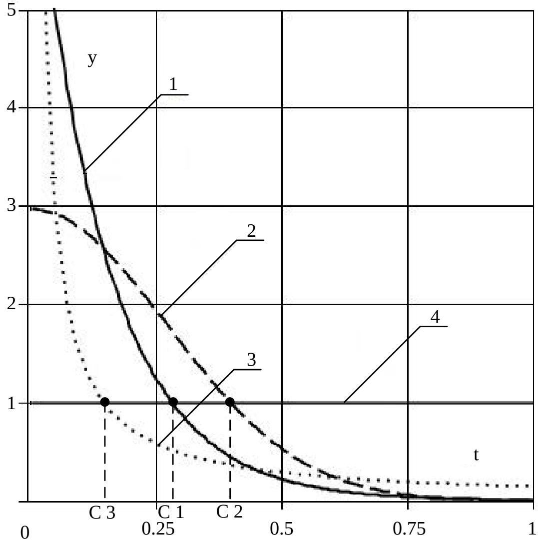

Рис. 1. Залежності нормованих функцій: 1 – графік зворотної функції f13(t) **; 2 – експоненти** f11(t) **; 3 – експоненти від** $-t^2$ f12(t) **;**
4 – значення інтеграла

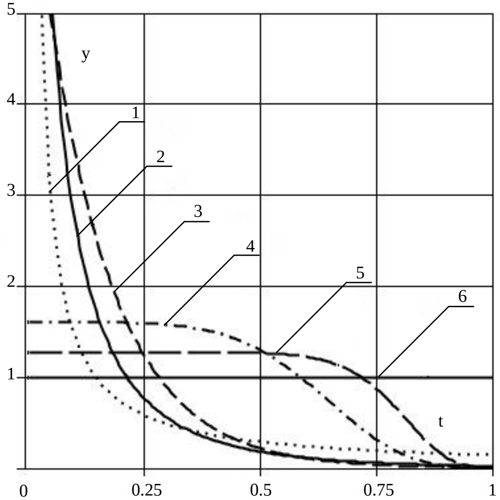

Рис. 2. Залежності нормованих функцій: 1 – $\frac{1}{t}$; 2 – e^{-t}; 3 – e^{-t^2};

4 – e^{-t^5}; 5 – $e^{-t^{10}}$; 6 – значення інтеграла

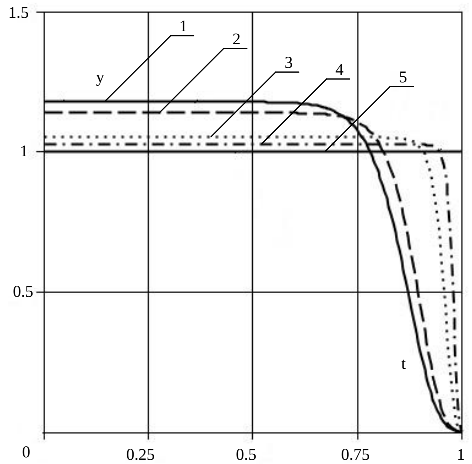

Рис. 3. Залежності нормованих функцій: 1 – e^{-t^9}; 2 – $e^{-t^{15}}$; 3 – $e^{-t^{50}}$;

4 – $e^{-t^{100}}$; 5 – значення інтеграла

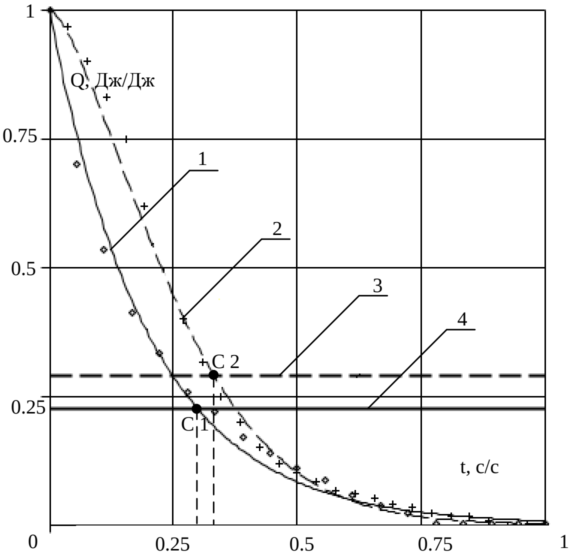

Рис. 4. Залежності нормованих експериментальних даних: 1 – нормовані значення корисної енергії для конвекції; 2 – для кондукції; 3 – значення для кондукції; 4 – значення для конвекції

На рис. 4 можна побачити, що точки С для кондуктивного та конвективного процесів знаходяться досить близько: $C_1 = \frac{1}{3}, C_2 = \frac{17}{52}$, величина ξ, відповідно: $\xi_1 = 2, \xi_2 = 2{,}05$. Обидва процеси апроксимуються функцією e^{-t} із невеликою розбіжністю за коефіцієнтами, що відповідає положенню точки С ($C \approx 0.33$ за експериментальними даними, і $C \approx 0.28$ – за даними теоретичних розрахунків).

Як приклад застосування фізико-математичної моделі розглянемо процес нагрівання тіла. Процес нагрівання був узятий через те, що він поширений у технології харчових виробництв. Згідно з визначеннями «теплота» й «температура», температура завжди прагне до рівноваги для будь-яких термодинамічних систем, що знаходяться в тепловому контакті.

Для перевірки даних припущень були проведені експерименти з нагрівання тіла відомої маси і теплоємності кондуктивним і конвективним способами. Як зразок використовувався алюмінієвий циліндр масою $m = 0{,}57$ кг, питома теплоємність зразка $C = 903$ Дж/(кг · К). Потужність нагрівача для кондуктивного способу $P_1 = 60$ Вт; для конвективного – $P_2 = 400$ Вт. Експеримент вважався завершеним за умови виходу на стаціонарний режим. Результати обробки експериментальних даних наведено на рис. 5.

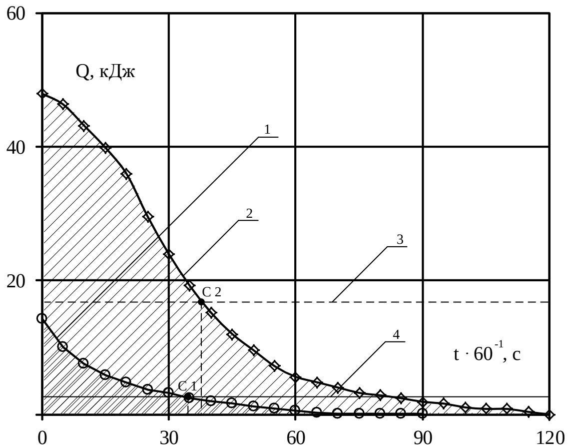

Рис. 5. Результати досліджень процесу нагрівання зразка різними способами: 1 – конвективне нагрівання; 2 – для кондуктивного нагрівання; 3 – значення для кондукції; 4 – значення для конвекції

За результатами обробки експериментальних даних установлено, що загальна кількість енергії витраченої на здійснення процесу нагрівання конвективним та кондуктивним способами становить $4.68 \cdot 10^5$ Дж та $2.16 \cdot 10^6$ Дж відповідно. Тобто за параметром кількості витраченої енергії кондуктивне нагрівання ефективніше. За параметром величини корисної енергії, яку було витрачено на нагрівання зразка, як зображено на рис.5, це заштрихована площина, що лежить під кривими нагрівання, позначена як 1 та 2. За величиною ці площини дорівнюють прямокутникам, верхня межа яких позначена як 3 та 4. Перетин експериментальних кривих з цими прямокутниками дає положення точки С. Тобто за параметром кількості корисної енергії кондуктивне нагрівання також ефективніше. За параметром наближення ефективності течії процесу до ідеального, то процеси, що досліджувались із невеликою розбіжністю за коефіцієнтами, відповідно положенню точки С1 та С2 підтверджують данні отримані в результаті теоретичних розрахунків і майже подібні один до одного.

Висновки. Розглянуто концепцію оцінювання енергоефективності енерготехнологічних процесів, що ідентифікуються, як термодинамічна система. Проведено вибір і обґрунтування фізико-математичних методів моделювання та аналізу енерготехнологічних процесів харчових виробництв для оцінки їх ефективності. Запропоновано аналізувати стан термодинамічної системи на основі законів збереження, другого закону термодинаміки з використанням термодинамічних потенціалів, та провести подальше оцінювання енерготехнологічних процесів харчових виробництв.

Список джерел інформації / References

1. Богачев В. И. Действительный и функциональный анализ. Университетский курс, В. И. Богачев, О. Г. Смолянов – М.: – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 332 с.

Bogachev, V. I., Smolyanov, O.G. (2009), *Valid and functional analysis. University course* [*Deystvitelnyiy i funktsionalnyiy analiz. Universitetskiy kurs*], Izhevsk, 332 p.

2. Погожих, М. І. Концепція підвищення енергоефективності технологічних процесів харчових виробництв / М. І. Погожих, М. А. Чеканов, А. О. Пак // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / відпов. ред. О. І. Черевко. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Вип. 1 (21). – С. 139–147.

Pogozhih, M. I., Chekanov, M.A., Pak, A.O. (2015), "The concept of energy efficiency of food production processes" ["KontseptsIya pIdvischennya energoefektivnostI tehnologIchnih protsesIv harchovih virobnitstv"], *ProgresivnI tehnIka ta tehnologivli harchovih virobnitstv restorannogo gospodarstva i torgivli*: zb. nauk. pr. HDUHT. Kharkiv, Vol. 1 (21), pp. 139-147.

3. Босс В. Лекции по математике. Т. 5: Функциональный анализ. В. Босс – М, 2005 – 216 с.

Boss, V. (2005), *Lectures on mathematics. Vol. 5: Functional Analysis* [*Lektsii po matematike. Tom 5: Funktsionalnyiy analiz*], Moscow, 216 p.

4. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров – М., 2001 – 384 с.

Venttsel, E.S., Ovcharov, L.A. (2001), *The theory of stochastic processes and its engineering applications* [Teoriya sluchaynyih protsessov i ee inzhenernyie prilozheniya], Moscow, 384 p.

Погожих Микола Іванович, д-р техн. наук, проф., кафедра фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-00. E-mail: m.pogozhikh@hduht.edu.ua.

Погожих Николай Иванович, д-р техн. наук, проф., кафедра физико-математических и инженерно-технических дисциплин, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-00. E-mail: m.pogozhikh @hduht.edu.ua.

Pogozhikh Mykola, Doctor of science, Professor, Department of physical and mathematical and engineering-technical disciplines, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-00. E-mail: m.pogozhikh@hduht.edu.ua.

Сєдунова Віра В'ячеславівна, асист., кафедра фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-00. E-mail: sdnva@ukr.net.

Седунова Вера Вячеславовна, асист., кафедра физико-математических и инженерно-технических дисциплин, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-00. E-mail: sdnva@ukr.net.

Sedunova Vera, assist., Department of physical and mathematical and engineering-technical disciplines, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-00. E-mail: sdnva@ukr.net.

Чеканов Микола Анатолійович, канд. техн. наук, доц., кафедра фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-00. E-mail: m.chekanov @hduht.edu.ua.

Чеканов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, доц., кафедра физико-математических и инженерно-технических дисциплин, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-00. E-mail: m.chekanov @hduht.edu.ua.

Chekanov Mykola, PhD, Associate Professor, Department of physical and mathematical and engineering-technical disciplines, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-00. E-mail: m.chekanov@hduht.edu.ua.

Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.О. Потаповим.
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.