



DOI: 10.31388/2220-8674-2022-1-3

УДК 681.5

В. Г. Федоров<sup>1</sup>, д.т.н., проф.

ORCID 0000-0002-4453-4122

О. І. Кепко<sup>2</sup>, к.т.н., доц.

ORCID 0000-0003-1443-307X

В. М. Кепко<sup>3</sup>, к.е.н. доц.

ORCID 0000-0001-6432-7211

<sup>1</sup>Професор-консультант<sup>2</sup>Уманський національний університет садівництва<sup>3</sup>Білоцерківський національний аграрний університет

e-mail: kepko@meta.ua, тел.: (063)0499929

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТРАНЗИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

*Анотація.* Застосування методу транзитної калориметрії дає змогу поглибити знання про нечіткий фазовий перехід в молочних продуктах, уточнити інформацію про технологічні та теплофізичні характеристики продуктів, встановити зв'язки між ними, зменшити енергетичні та матеріальні ресурси на одиницю готової продукції. Автоматизація транзитного калориметра, що належить до теплометричних калориметрів та працює в скануючому режимі дає можливість не тільки підвищити точність комплексного вимірювання теплофізичних характеристик лабільних матеріалів, а й одержати принципово нову інформацію – встановити функціональний зв'язок між жирністю і теплопровідністю вершків, гістерезис теплоємності молочного жиру тощо. Різке зменшення випадкових похибок за рахунок автоматизації калориметра призвело не тільки до підвищення точності визначення ТФХ, а й до отримання нової інформації. Таким чином, в результаті досліджень вдалося вирішити «зворотну» задачу – встановити залежність жиру від теплопровідності, близьку до функціональної. Це важливо для молочної промисловості, оскільки теплопровідність можна визначити набагато швидше, ніж жир. Також встановлено, що теплоємність молочного жиру в інтервалі температур активних фазових перетворень залежить від того, чи нагрівається, чи охолоджується молочний жир. Це може призвести до виправлення довідкових даних. Порівняно проста схема автоматизації калориметричних установок полегшила роботу оператора, підвищивши точність вимірювань, дозволила отримати принципово нову інформацію. Її можна використовувати в інших пристроях, коли



первинні перетворювачі виробляють невеликі сигнали постійного струму.

*Ключові слова.* Автоматичне управління, теплофізичні характеристики, молочний жир, теплоємність, фазовий перехід, транзитна колориметрія, тепломір.

*Постановка проблеми.* При дослідженні теплофізичних характеристик ТФХ підтримання стаціонарних та перехідних режимів ручним керуванням планіметруванням з виконанням вимог квазістаціонарного метода вручну приводить до появи, крім систематичної ще й і випадкових похибок, які почасти не вкладаються до їх нормального розподілу. В зв'язку з цим виникає необхідність підвищення точності вимірювань шляхом автоматизації процесу вимірювання ТФХ.

*Аналіз останніх досліджень.* Базовими елементами транзитного калориметра є тепломіри – малогабаритні малоінерційні датчики густини теплового потоку  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, розроблені в Україні [1], які тепер застосовуються в багатьох країнах світу, причому їх товщина від 1-2 мм доведена до кількох мікрометрів [2, 3].

Транзитний калориметр ТК [3] для комплексного вимірювання основних теплофізичних характеристик ТФХ твердих, пастоподібних, рідких, зернистих матеріалів, які можна сформувати у вигляді плоского шару. По обидві сторони шару один навпроти другого розташовують два тепломіри з термopарами, що контактують з поверхнею шару [4].

*Формування мети статті.* Автоматизувати процес визначення ТФК шляхом використання транзитного калориметра для комплексного вимірювання теплофізичних характеристик молочних продуктів.

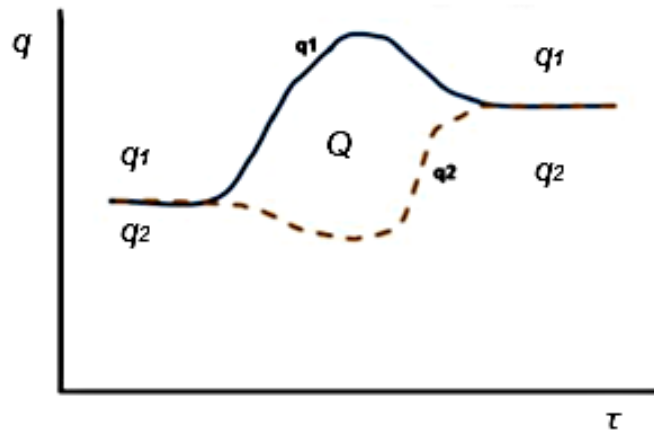
*Основна частина.* За умови стаціонарного теплового потоку, нормального до цих поверхонь, сигнали тепломірів  $q_1 = q_2 = q$ , це дає можливість визначати теплопровідність  $\lambda$ , Вт/(м·К) зразка:

$$\lambda = q/\Delta t \quad (1)$$

де:  $\Delta t = t_1 - t_2$  – різниця температур на поверхнях зразка.

Якщо між двома стаціонарними режимами зробити збурення по  $q$  або  $t$  (на рис. 1 різким збільшенням  $q_1$ ) та фіксувати  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $t_1$  і  $t_2$  то одержимо замкнуту поверхню  $Q$ , Дж/м<sup>2</sup>

$$Q = \int (q_1 + q_2) dt \quad (2)$$

Рисунок 1. Зміна  $q_1$ , та  $q_2$ , (цикл) для колориметра із ТК-ТК

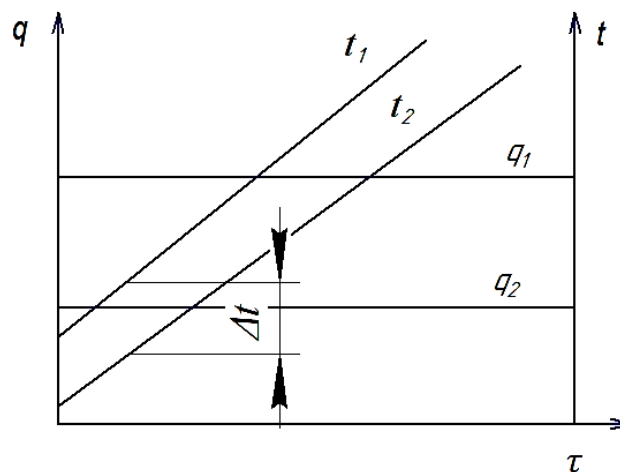
Це дає можливість підрахувати об'ємну теплоємність  $C_v$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К)

$$c_v = \frac{Q}{h \cdot \delta \cdot t} \quad (3)$$

де:  $h$  – товщина зразка.

Оскільки новий стаціонарний режим може служити початком нового циклу, маємо можливість за один дослід вимірювати  $\lambda$  та  $c_v$  в залежності від температури зразка, що є важливим для лабільних матеріалів. Температуропровідність  $\alpha = \lambda/c_v$  та теплову активність  $b = \sqrt{\lambda \cdot c_v}$  одержуємо розрахунком.

Більш швидкісним виявився квазістаціонарний режим калориметра (регулярний режим другого роду), коли виконується умова  $q_1/q_2 = const$  (рис. 2). Для цього необхідно, наприклад, підтримувати  $q_1 = const$  або температури поверхонь лінійно змінювати в часі [5].

Рисунок 2. Зміна  $q$  та  $t$  у квазістаціонарному режимі

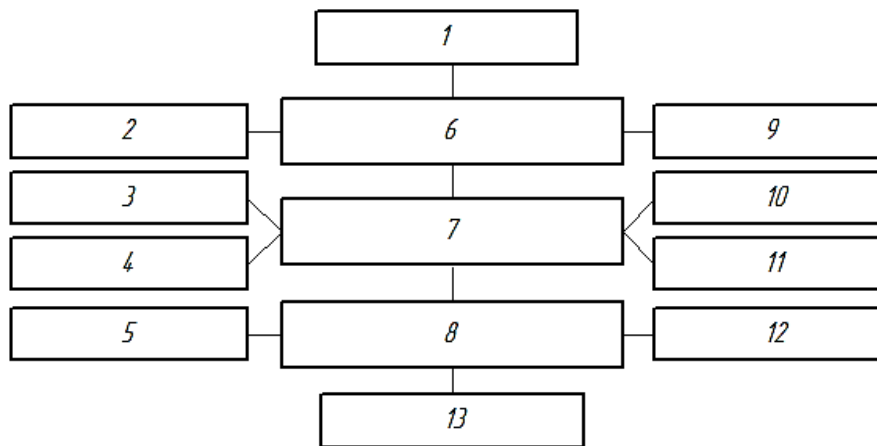
Безперервний запис  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $t_1$  та  $t_2$ , дає можливість в будь який момент досліду обчислити обидві ТФХ:

$$\lambda = \frac{(q_1 + q_2)h}{2\Delta t}; \quad c_v = \frac{q_1 - q_2}{u\alpha}; \quad (4)$$

де:  $u = \delta t / (\tau_2 - \tau_1)$  – швидкість зміни температури поверхонь зразка.

Будь який ТК складається з трьох блоків (рис. 3): підведення та відведення теплової енергії і вимірювального блока. В блоках підведення теплоти використовується термостатована камера та електронагрівник або інфрачервоне джерело, в блоках відведення – ТК, термостатована пластина або напівпровідниковий термостат. Схема приладу з двома ТК наведена на рисунку 4.

Роботу установки із ТК-ТК (рис. 4) автоматизовано шляхом її сполучення із комп'ютером (рис. 5). Для цього використані: серійний агрегатний комплекс К484, що складається із таймера Ф4849 2, комутатора Ф4840 3 та транскриптора Ф4845 4, а також вольтметра Ф283/2М(5). Цей комплекс під'єднали до блока узгодження, та передавання інформації Б01-10 6 розробленого спеціалістами НВЛ «Технополіс».

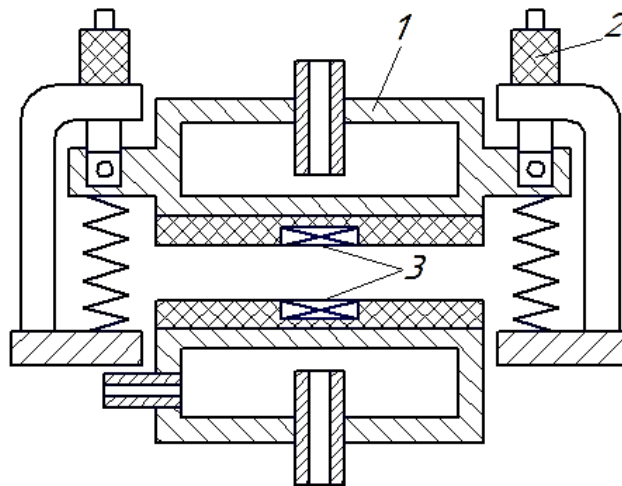


1, 13 – регулювання; 2, 5 – термостатування; 3 – механічне навантаження; 4 – товщина шару; 6 – підвищення температури; 7 – вимірювання; 8 – відведення теплоти; 9, 12 – живлення; 10 – густина теплового потоку; 11 – температура.

Рисунок 3. Блок-схема приладів для вимірювання ТФХ

На вхід транскриптора подавались сигнали термомірів  $e_q$  та від термопар  $e_t$ , мВ.

На комутаторі встановлюють перелік каналів опитування:  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\Delta t$  та кількість вимірювань. За допомогою таймера задаються проміжки часу між записами каналів та вимірюванням електричних сигналів, після чого обчислювально-порівняльний комплекс



1 – термостатована камера; 2 – регулятор механічного навантаження; 3 – тепломіри з термопарами.

Рисунок 4. Схема калориметра з ТК-ТК

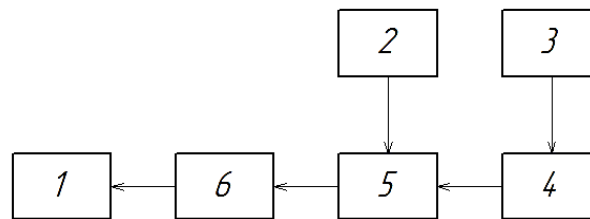


Рисунок 5. Структурна схема автоматизації калориметра

підключають до мережі. Діалог калориметра із ПК має зворотній зв'язок. Наприклад, якщо відхилення  $q_1$ , чи  $q_2$  від постійних значень перевищує дозволений рівень, подається звуковий сигнал, обчислення ТФК зупиняється.

Різке зменшення випадкових похибок внаслідок автоматизації калориметра привело не тільки до підвищення точності визначення ТФХ, але й до отримання нової інформації. Так, в роботі [6] де досліджували залежність ТФХ вершків від жирності  $\mathcal{J}$ , при цьому вдалося розв'язати «інверсну» задачу – встановити залежність жирності від  $\lambda$ , близьку до функціональної. Це важливо для молочної промисловості, оскільки визначити  $\lambda$  можна значно швидше, ніж  $\mathcal{J}$ . Встановлено також, що теплоємність молочного жиру МЖ в температурному діапазоні активних фазових перетворень [7] залежить від того, нагрівається МЖ або охолоджується [8, 9]. Це може привести до корекції довідникових даних [10].

*Висновок.* Порівняно проста схема автоматизації калориметричних установок полегшила працю оператора, збільшивши точність вимірювань, дала можливість одержати принципово нову інформацію. Її можна використовувати в інших приладах, коли



первинні перетворювачі виробляють малі сигнали постійного струму.

#### Список використаних джерел

1. Датчик для измерения локальных тепловых потоков: пат. 159048 СССР: G01K 17/08. № 793219/26-10; заявл. 01.09.1962; опубл. 22.11.1963, Бюл. № 23. 58 с.
2. Knauss H., et al. Novel Sensor for Fast Heat Flux Measurements. AIAA. 2006. No. 3637. 32 p. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.32011?journalCode=jsr>.
3. Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції: Методика М 00013184.5.023-01 / Розробники : Т.Г. Грищенко та ін. Київ : ЛОГОС, 2002. 131 с. ISBN 966-581-354-4.
4. Wang Y. et al. Effect of Melting Point on the Physical Properties of Anhydrous Milk Fat. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2017. Vol. 274. №. 1. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/274/1/012072/meta>
5. Upadhyay N. et al. Detection of adulteration by caprine body fat and mixtures of caprine body fat and groundnut oil in bovine and buffalo ghee using differential scanning calorimetry. *International Journal of Dairy Technology*. 2017. Vol. 70, №. 2. P. 297–303. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12336>
6. Керко В. М. та ін. Використання кореляції товарознавчих і теплофізичних характеристик вершків для їх експертизи. *Science and Technology of the Present Time: Priority Development Directions of Ukraine and Poland: International Multidisciplinary Conference*, м. Wolomin, 19–20 жовт. 2018 р. Wolomin, 2018. С. 102–106. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/2775>
7. Егоров В. М., Марихин В. А., Мясникова Л. П. Фазовые переходы в молекулярных кристаллах дикарбоновых кислот. *Физика твёрдого тела*. 2013. Т. 55, № 5. С. 975–980. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/1039>
8. Fedorov V. G. et al. Study of blurring and hysteresis of phase transformations of milk fat by transit calorimetry method. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*. 2020. No. 12(3). P. 105–118. URL: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/7575>
9. Tolstorebrov I., Eikevik T.M., Bantle M. A DSC determination of phase transitions and liquid fraction in fish oils and mixtures of triacylglycerides. *Food research international*. 2014. Vol. 58. P. 132–140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.064>
10. Федоров В. Г. та ін. Теплофізичні характеристики продуктів і матеріалів АПК: довідник. Умань: Редакц.-вид. від. УНУС, 2014. 352 с. URL: <http://www.lib.udau.edu.ua/handle/123456789/2762>



Стаття надійшла до редакції 11.02.2022 р.

**V. Fedorov<sup>1</sup>, O. Kepko<sup>2</sup>, V. Kepko<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Professor-Consultant**

**<sup>2</sup>Uman National University of Horticulture**

**<sup>3</sup>Bila Tserkva National Agrarian University**

## **AUTOMATION OF A TRANSIT CALORIMETER FOR INTEGRATED MEASUREMENT OF THE MAIN THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF DAIRY PRODUCTS**

### *Summary*

The application of the transit calorimetry method makes it possible to deepen the knowledge about the fuzzy phase transition in dairy products, clarify information about technological and thermophysical characteristics of products, establish links between them, reduce energy and material resources per unit of finished product. Maintenance of stationary and transient modes by manual control before the appearance, in addition to the systematic and random errors, which often did not fit into their normal distribution. Automation of transit calorimeter, which belongs to thermometric calorimeters and works in scanning mode, allows not only to increase the accuracy of complex measurement of thermophysical characteristics of labile materials, but to obtain fundamentally new information - to establish a functional relationship between fat and thermal conductivity, cream hysteresis, etc. The sharp decrease in random errors due to calorimeter automation has led not only to increased accuracy of TFH determination, but also to obtaining new information. Thus, as a result of research it was possible to solve the "inverse" problem - to establish the dependence of fat on thermal conductivity, close to functional. This is important for the dairy industry, as thermal conductivity can be determined much faster than fat. It is also established that the heat capacity of milk fat in the temperature range of active phase transformations depends on whether the milk fat is heated or cooled. This can lead to the correction of reference data. The relatively simple scheme of automation of calorimetric installations facilitated the work of the operator, increasing the accuracy of measurements, made it possible to obtain fundamentally new information. It can be used in other devices when the primary converters produce small DC signals.

**Key words.** Automatic control, thermophysical properties, milk fat, heat capacity, phase transition, transit calorimetry, heat meter.