

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗНЕЖИРЕНОГО МОЛОКА ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І КОНЦЕНТРАЦІЇ СЗМЗ

СКАРБОВІЙЧУК О.М., канд. техн. наук, доцент,
Національний університет харчових технологій, м. Київ
ФЕДОРОВ В. Г., д-р техн. наук, професор
Уманський національний університет садівництва, м. Умань

За результатами експериментальних досліджень методами і засобами теплотерії теплофізичних характеристик знежиреного молока на інтервалі температури від 0 до 90 °С і масової частки сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ) від 0,092 до 0,5 визначені емпіричні залежності вимірюваних характеристик від температури і концентрації СЗМЗ в досліджуваній сировині.

The empirical functions of thermophysical characteristics of defatted milk were estimated on the basis of heatflowmetric researches. As independent variables stand duty temperature (interval 0 – 90 °C) and concentration of dry milk residuum (0,092 – 0,5).

Ключові слова: знежирене молоко, теплофізичні характеристики, теплотерія, емпіричні залежності.

Довготривале і, здебільше, багатовитратне експериментальне дослідження технологічних процесів та обладнання в харчовому виробництві є головним, а в багатьох випадках, єдиним засобом отримання необхідної інформації про досліджуваний об'єкт і його засаднича роль в галузевій науці залишиться назавжди.

Тому, виходячи із об'єктивності зазначеного, для прискорення наукових досліджень і технічного прогресу в галузі потрібно повсюдно використовувати найсучасніші засоби прискорення обробки даних – комп'ютерні технології, за допомогою яких узагальнюються результати досліджень і розширюється коло користувачів отриманих дослідних даних. Узагальнені результати досліджень у вигляді математичних моделей придатні для подальшого комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів і обладнання без проведення натурних експериментів. Створені програмні продукти слід використовувати не тільки для наукових досліджень, але й для навчання студентів – майбутніх фахівців. Такий підхід визначено пріоритетним напрямком "інформатизації в сфері науки, освіти і культури" в Концепції Національної програми інформатизації [1].

Важливим напрямком досліджень в харчовій галузі науки є вивчення процесів і обладнання термічної (теплової та холодильної) обробки продуктів і сировини під час їх виробництва і зберігання. Зокрема, для виробництва концентрованого знежиреного молока, яке є сировиною для продуктів харчування, кормових засобів для телят великої рогатої худоби, медичних препаратів і технічних напівфабрикатів [2], використовуються термічні процеси для підвищення вмісту сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ), де потрібно знати теплофізичні характеристики знежиреного молока різної концентрації при різних температурах для раціонального ведення процесів випаровування вологи із знежиреного молока.

Співробітниками кафедри теплотехніки НУХТ на основі малогабаритних і практично безінерційних приладів вимірювання локальної в часі і просторі густини теплового потоку створено комплексний теплотеричний метод калориметра з направленим транзитом теплоти для вимірювання теплофізичних характеристик продуктів та матеріалів різної консистенції [3]. На дослідній установці, яка втілювала створений метод, проведено комплексне вимірювання теплофізичних характеристик: теплопровідності λ , Вт/(м·К) і об'ємної теплоємності c_v , Дж/(м³·К) знежиреного молока на інтервалах зміни температури від 0 до 90°C і масової частки СЗМЗ від 0,092 до 0,5 [4].

Отримані результати вимірювання теплопровідності λ наведені в таблиці 1.

Для визначення емпіричної функції, яка б описувала залежність цієї характеристики від обох аргументів – температури t і масової частки СЗМЗ ξ , були побудовані окремі графіки її залежності від температури і масової частки СЗМЗ, представлені на рисунку 1. На верхньому графіку нанесені експериментально виміряні значення λ знежиреного молока, визначених концентрацій СЗМЗ, (кожній концентрації відповідає свій маркер) на досліджуваному інтервалі зміни температури, а на нижньому –

значення цієї ж характеристики за сталих температур молока (кожній вибраній температурі відповідає свій маркер), на інтервалі зміни концентрації СЗМЗ.

Таблиця 1

Теплопровідність знежиреного молока λ , Вт/(м·К)

t, °C	Масова частка СЗМЗ					t, °C	Масова частка СЗМЗ				
	0,092	0,2	0,3	0,4	0,5		0,092	0,2	0,3	0,4	0,5
0	0,525	0,492	0,464	0,439	0,417	50	0,598	0,558	0,528	0,501	0,478
5	0,532	0,499	0,47	0,445	0,423	55	0,599	0,564	0,534	0,507	0,484
10	0,539	0,505	0,477	0,451	0,429	60	0,606	0,571	0,541	0,514	0,49
15	0,545	0,512	0,483	0,457	0,435	65	0,613	0,577	0,547	0,52	0,496
20	0,552	0,519	0,49	0,464	0,441	70	0,619	0,584	0,554	0,526	0,502
25	0,559	0,525	0,496	0,47	0,447	75	0,62	0,591	0,56	0,532	0,508
30	0,565	0,532	0,502	0,478	0,453	80	0,633	0,597	0,566	0,539	0,514
35	0,572	0,538	0,509	0,482	0,459	85	0,64	0,604	0,573	0,545	0,52
40	0,579	0,545	0,515	0,489	0,465	90	0,647	0,61	0,579	0,551	0,526
45	0,586	0,551	0,522	0,495	0,472						

Із наведених графіків видно, що теплопровідність молока з досліджуваними концентраціями СЗМЗ пропорційно збільшується з підвищенням температури, а зі збільшенням концентрації СЗМЗ – теплопровідність пропорційно зменшується.

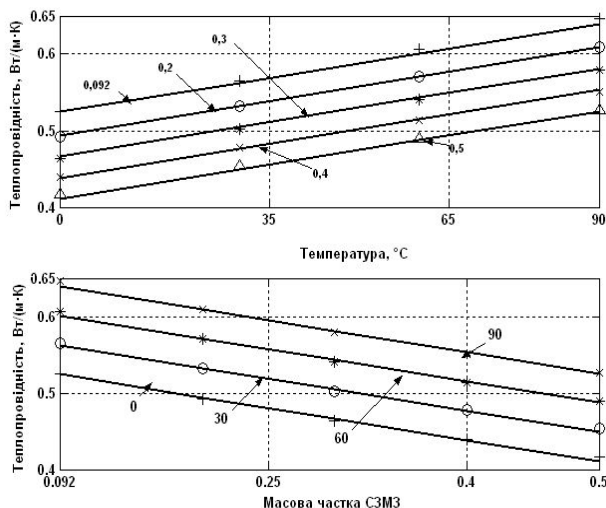


Рис.1. Залежність теплопровідності знежиреного молока від температури і концентрації СЗМЗ.

Тому для апроксимації залежності теплопровідності від температури і концентрації СЗМЗ обрано лінійну функцію двох змінних:

$$\lambda(t, \xi) = 0,201 + 1,278 \cdot 10^{-3} \cdot (t + 273) - 0,279 \cdot \xi, \quad (1)$$

де t – температура молока, °C; ξ – концентрація СЗМЗ, масова частка.

Відхилення обчислених значень теплопровідності $\lambda(t, \xi)$ за формулою (1) від отриманих експериментально не перевищує 1,5 %.

На обох графіках рисунка 1 побудовано суцільні лінії визначеної емпіричної функції $\lambda(t, \xi)$ (1) з відповідно усталеними і змінними аргументами t і ξ , які практично узагальнюють експериментальні точки, що наочно свідчить про адекватність описання цієї функцією теплопровідності знежиреного молока на зазначених інтервалах температури і концентрації СЗМЗ.

Переважає більшість методик теплових розрахунків процесів і обладнання харчової промисловості використовує масову теплоємність c , Дж/(кг·К), тому, з метою спрощення використання отриманих результатів і розширення кола їх користувачів, експериментально виміряну об'ємну теплоємність c_v , Дж/(м³·К) перераховано в масову теплоємність c , Дж/(кг·К) з використанням залежності питомого об'єму молока від температури і концентрації СЗМЗ із [5], і результати наведені в таблиці 2.

Теплоємність знежиреного молока c , Дж/(кг·К)

t, °C	Масова частка СЗМЗ					t, °C	Масова частка СЗМЗ				
	0,092	0,2	0,3	0,4	0,5		0,092	0,2	0,3	0,4	0,5
0	3914	3566	3244	2922	2600	50	3987	3725	3483	3240	2997
5	3921	3582	3268	2954	2640	55	3994	3741	3506	3272	3037
10	3929	3598	3292	2986	2679	60	4002	3757	3530	3304	3077
15	3936	3614	3316	3017	2719	65	4009	3773	3554	3335	3117
20	3943	3630	3339	3047	2759	70	4016	3789	3578	3367	3157
25	3951	3646	3363	3081	2799	75	4023	3805	3602	3399	3196
30	3953	3661	3387	3113	2839	80	4031	3820	3626	3431	3236
35	3965	3677	3411	3145	2878	85	4036	3836	3649	3463	3276
40	3972	3693	3435	3176	2918	90	4045	3852	3673	3494	3315
45	3980	3709	3459	3208	2958						

Для визначення характеру її залежності від температури t і концентрації СЗМЗ ξ побудовано відповідні графіки, представлені на рисунку 2. На верхньому графіку нанесені експериментальні точки теплоємності молока досліджуваних концентрацій СЗМЗ (кожній концентрації відповідає свій маркер), коли змінюється температура молока, де очевидно, що теплоємність молока пропорційно збільшується зі збільшенням його температури і зменшується зі збільшенням концентрації СЗМЗ в молоці. Слід також зазначити, що збільшення концентрації СЗМЗ прискорює зростання теплоємності молока при збільшенні його температури. На нижньому графіку нанесені теплоємності молока фіксованих температур (для кожної температури вибрано свій маркер) при зміні концентрації СЗМЗ в ньому, де видно, що теплоємність зменшується зі збільшенням концентрації СЗМЗ і збільшується зі збільшенням температури, але збільшення температури уповільнює зменшення теплоємності зі збільшенням концентрації СЗМЗ в молоці. За наведеної поведінки теплоємності можна зробити висновок про парну взаємодію обох її аргументів. Тому для формалізації впливу температури і концентрації СЗМЗ на теплоємність молока була побудована емпірична функція, де крім лінійного впливу факторів (температури і концентрації СЗМЗ) враховується їх парна взаємодія:

$$c(t, \xi) = 4193 + 0,051 \cdot (t+273) - 7468 \cdot \xi + 15,62 \cdot (t+273) \cdot \xi, \quad (2)$$

Обчислені значення теплоємності $c(t, \xi)$ за формулою (2) відрізняються від отриманих експериментально не більше ніж на 0,5 %.

За визначеною емпіричною залежністю (2) на обох графіках рисунка 2 побудовано суцільні лінії $c(t, \xi)$, за відповідно фіксованих і змінних аргументах t і ξ , які добре збігаються з експериментальними точками, що свідчить про адекватність описання визначеною функцією (2) теплоємності знежиреного молока.

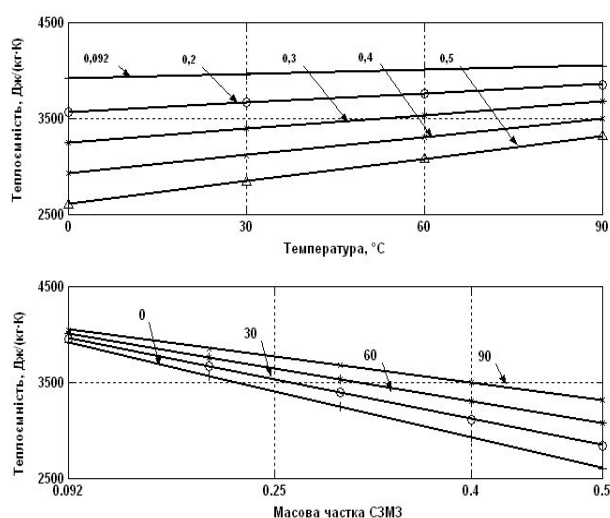


Рис. 2. Залежність теплоємності знежиреного молока від температури і концентрації СЗМЗ.

Оскільки в розрахунках теплообмінних та гідродинамічних процесів харчової промисловості значно ширше використовується теплофізична характеристика – густина ніж питомий об'єм, то використовуючи із [5] залежність питомого об'єму знежиреного молока, було побудовано емпіричну функцію густини ρ досліджуваної сировини на визначених інтервалах зміни температури t і концентрації ξ СЗМЗ у вигляді лінійного полінома:

$$\rho(t,\xi) = 1149 - 0,531 \cdot (t+273) + 440,67 \cdot \xi, \quad (3)$$

Відхилення обчислених значень густини $\rho(t,\xi)$ знежиреного молока за формулою (3) від обчислених за формулою із [5] не перевищує 1,0 %.

Висновки. Виконані експериментальні дослідження теплофізичних характеристик знежиреного молока розширюють обсяг знань про харчові продукти, а їх формалізація розрахунковими залежностями значно спростить алгоритмізацію розрахунків на комп'ютерах процесів і обладнання молочної промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Концепція Національної програми інформатизації*. /<http://www.icyb.kiev.ua/index2.htm>
2. *Храмцов А.Г., Василицин С.В.* Промышленная переработка вторичного молочного сырья. – М.: ДеЛипринт, 2003. – 100 с.
3. *Федоров В.Г.* Теплометрия в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1974. –176 с.
4. *Пахомов В.Н.* Разработка приборов и комплексное исследование теплофизических характеристик лабильных материалов : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1980. – 21 с.
5. *Ересько Г.А., Работягова Л.И., Ересько В.А., Чистякова М.А.* Исследование физических свойств молочного жира и сливок. – «Труды ВНИИМС», 1973, Выпуск 13, с. 13 – 26.