

Зависимость теплофизических характеристик белковых продуктов от их компонентного состава

Игорь Алексеевич Короткий, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой

E-mail: krot69@mail.ru

Елена Валерьевна Короткая, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры

Лариса Александровна Проскурякова, д-р биол. наук, доцент профессор кафедры

Денис Алексеевич Ефремов, аспирант

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово

Применение пищевых добавок и заменителей при производстве пищевых продуктов позволяет производителю моделировать их органолептические характеристики пищевых продуктов, а также регулировать их пищевую ценность. Это позволяет увеличить ассортимент пищевой продукции и снизить ее стоимость. Молочный белок и жир, одни из основных компонентов сыра, являются привлекательными объектами для фальсификации у некоторой категории производителей. Поэтому разработка пищевых добавок и технологий их использования должно сопровождаться разработкой и внедрением различных методов объективного контроля, позволяющих определять истинный состав пищевых продуктов. Анализ теплофизических характеристик молочных продуктов на белково-жировой основе, в частности сыра, позволяет с достаточной степенью точности определить соответствует ли заявленный производителем компонентный состав истинному набору и соотношению компонентов в готовой продукции. Метод двух температурно-временных интервалов, являясь комплексным методом анализа, позволяет определять теплофизические характеристики сыров в ускоренном режиме. Продолжительность проведения анализа составляет до 30 минут, а обработка полученных данных может быть реализована в автоматическом режиме. Погрешность метода составляет менее 1%.

Ключевые слова: теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, компонентный состав сыра, белок, молочный жир

Для цитирования: Зависимость теплофизических характеристик белковых продуктов

от их компонентного состава / И. А. Короткий, Е. В. Короткая, Л. А. Проскурякова, Д. А. Ефремов //

Сырделие и маслodelие. 2024. № 1. С. 86-92. <https://www.doi.org/10.21603/2073-4018-2024-1-5>

Введение

Одним из важнейших направлений развития пищевой промышленности является разработка различных пищевых добавок и заменителей, которые позволяют моделировать заданные органолептические характеристики пищевых продуктов. Внедрение таких пищевых добавок и заменителей в производство продуктов питания позволяет значительно увеличить ассортимент выпускаемой продукции, снизить их стоимость и, таким образом, повысить их привлекательность для различных категорий потребителей [1].

Вместе с тем, разработка подобных добавок и заменителей создает для производителей широкие возможности для фальсификации производимых товаров, так как позволяет заменять натуральные, дорогие ингредиенты на более дешевые их заменители, при этом потребитель не всегда может определить эту замену [2]. Поэтому разработка добавок и заменителей, позволяющих моделировать органолептические свойства пищевых продуктов, должна сопровождаться разработкой и внедрением различных методов объективного контроля, позволяющих определять истинный состав пищевых продуктов [3].



Источник изображения: Freepik.com



Сыр является высокоценным белковым продуктом, составляющим значительную часть пищевого рациона. Формирование и созревание сыров происходит под действием различных ферментных систем, которые могут включать в себя бактерии различного генеза, плесени, дрожжи, сырную слизь и прочую микрофлору [4].

Значительную часть компонентного состава сыров составляют белки. Массовая доля этого компонента составляет $15 \div 27$ %. Основную часть белкового компонента составляют различные фракции казеина [5]. На долю молочного жира в сыре приходится от 20 до 32 %. Жир в сыре находится, главным образом, в виде жировых шариков, 94 % которых имеют диаметр от 3 до 6 мкм. Количество воды в сыре составляет $36 \div 75$ %. Водная фракция содержит минеральные компоненты и другие вещества, не выпадающие в осадок и не образующие сгусток при ферментативном воздействии [6].

Из минеральных компонентов наиболее высокую массовую долю в сыре имеет хлорид натрия. Он составляет в зависимости от вида сыра от 1,0 до 3,5 %. Сыры рассольной группы могут содержать от 8 до 15 % этого компонента [7].

Компонентный состав любого продукта, а также соотношения этих компонентов в значительной степени определяют индивидуальный комплекс характеристик этого продукта. Важной группой физических величин, которые определяют индивидуальные свойства продукта являются теплофизические характеристики.

Теплофизические характеристики – это комплекс физических величин, описывающих особенности формирования температурного поля в объекте исследования, а также возможности объекта в тепловых взаимодействиях с другими телами. К теплофизическим характеристикам, в частности, относятся теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность [8].

Каждое вещество обладает определенными значениями теплофизических характеристик. Для определения теплофизических характеристик используются различные экспериментальные и аналитические методики. Также широко используются различные математические модели, которые описывают величины, характеризующие теплофизические свойства объекта в зависимости от его состава, структуры и температуры [9]. Несомненным является то, что состав многокомпонентного объекта и его теплофизические характеристики – взаимосвязанные величины. Поскольку состав сыров характеризуется определенным набором основных компонентов, очевидно, что содержание и соотношение этих компонентов может быть определено по теплофизическим характеристикам исследованного сыра.

Целью исследования являлась установка взаимосвязи между компонентным составом сыров и численными значениями их теплофизических характеристик. И, на основании установленных взаимосвязей, разработка метода определения массовых долей основных компонентов сыров на основании результатов теплофизического исследования.



Источник изображения: Freepik.com

Объекты и методы исследований

Теплофизические исследования основывались на реализации метода двух температурно-временных интервалов [10].

Суть метода заключается в следующем. Измерительная система представляет из себя цилиндр B , длина которого значительно превышает его диаметр, и пластину M , которая представляет из себя исследуемый объект (рис. 1).

До начала эксперимента рабочая поверхность системы имеет температуру t_0 . Начало теплофизического исследования сопровождается интенсивным, практически мгновенным нагревом свободной поверхности до температуры t_H .

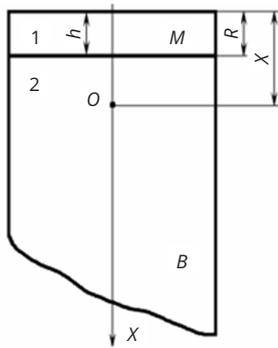


Рисунок 1. Принципиальная схема термометрической системы

Эта температура впоследствии поддерживается постоянной. Вследствие разности температур между свободной поверхностью и остальными частями термометрической системы, устанавливается нестационарное поле температур.

Изменение температуры t на некотором удалении x от рабочей поверхности, определяется из дифференциального уравнения теплопроводности для одномерного распределения температуры:

$$\frac{\partial t_k(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_k \frac{\partial^2 t_k(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где α_k – коэффициент температуропроводности.

Граничные условия, принимаемые для решения уравнения (1), соответствующие теплофизическим процессам, реализуемым в термометрической системе, характеризуются следующими уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0 \\ t_1(0, \tau) = t_H = const \\ t_2(\infty, \tau) = t_0 \\ t_1(R, \tau) = t_2(R, \tau) \\ \lambda_1 \frac{\partial t_1(\bar{r}, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(R, \tau)}{\partial x} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где 1, 2 – элементы термометрической системы с различными теплофизическими свойствами (в данном случае 1 – относится к пластине M , 2 – к цилиндру B).

Решение уравнения (1), совместно с уравнениями (2), может быть представлено в виде системы из двух уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{t_H - t_1}{t_H - t_0} = \left(1 + \frac{\lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a}) - 1}{\lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a}) + 1} \right) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1 - \lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a})}{\lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a}) + 1} \right)^i \operatorname{erfc} \left(\frac{h}{\dot{\alpha} \sqrt{a} \tau_1} \left(\frac{h_0 \alpha \sqrt{a}}{\dot{\alpha} \sqrt{a_B}} + 1 + 2 \times i \right) \right) \\ \frac{t_H - t_2}{t_H - t_0} = \left(1 + \frac{\lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a}) - 1}{\lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a}) + 1} \right) \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1 - \lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a})}{\lambda / (\dot{\alpha} \sqrt{a}) + 1} \right)^i \operatorname{erfc} \left(\frac{h}{\dot{\alpha} \sqrt{a} \tau_2} \left(\frac{h_0 \alpha \sqrt{a}}{\dot{\alpha} \sqrt{a_B}} + 1 + 2 \times i \right) \right) \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где α_B, b – коэффициент температуропроводности и постоянная теплоприемника; α, λ, h – коэффициенты температуропроводности, теплопроводности

и высота исследуемого объекта; h_0 – толщина буферного слоя теплоприёмника (расстояние от нижней поверхности исследуемого объекта до точки O).

Решение системы уравнений (7) производится численными методами при задании необходимого количества элементов ряда i , которое составляет для сыров 3 или 4.

Принципиальная схема лабораторной установки, используемой для определения теплофизических характеристик¹, изображена на рисунке 2.

Результаты и их обсуждение

Для получения теплофизических характеристик, исследуемый образец сыра размещался между поверхностями теплоприемника и нагревателем. До теплотехнического исследования вся термометрическая система находилась в тепловом равновесии. При подаче напряжения на нагреватель, его поверхность интенсивно разогревается до заданной температуры и поддерживается на этом уровне с точностью $\pm 0,1$ °С. Теплота от поверхности нагревателя проходит через исследуемый объект, нагревая его, и воспринимается теплоприемником [11]. Во всей термометрической системе возникает неравновесное поле температур. Изменение температур в термо-

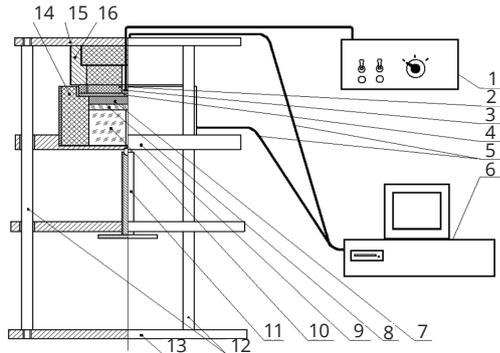


Рисунок 2. Принципиальная схема лабораторной установки для определения теплофизических характеристик:

- 1 – контроллер нагревателя; 2 – электронагреватель;
- 3 – датчик-регулятор температуры; 4 – термостатируемая поверхность; 5 – термопары для контроля температурного поля в измерительной системе; 6 – компьютер для обработки показаний термопар; 7 – объект теплофизических исследований; 8 – буферная прослойка теплоприемника; 9 – основание теплоприемника; 10 – теплоприемник; 11 – червячный механизм; 12 – направляющие оси; 13 – основание лабораторного стэнда; 14 – теплоизоляция термометрической системы; 15 – основание нагревателя; 16 – корпус нагревателя

метрической системе фиксируются термопарами. Результаты измерений в графической форме представляют из себя термограммы (рис. 3) [12].

Экспериментально полученная термограмма (линия 2, рис. 3) позволяет решить систему уравнений (7) относительно коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a объекта исследований [13]. На основании полученных значений теплофизических характеристик определяется объемная теплоемкость:

$$c_v = \lambda/a. \tag{4}$$

А при известной плотности исследуемого материала (ρ) и удельную величину массовой теплоемкости:

$$c_m = \lambda/(a \times \rho). \tag{5}$$

Для корректного определения теплофизических характеристик следует выбирать временные координаты τ_1 и τ_2 таким образом, чтобы они находились в зоне регулярного режима и при температурной стабильности свободной поверхности теплоприемника [14].

С помощью вышеприведенной методики были определены теплофизические характеристики различных сыров, результаты представлены в таблице 1.

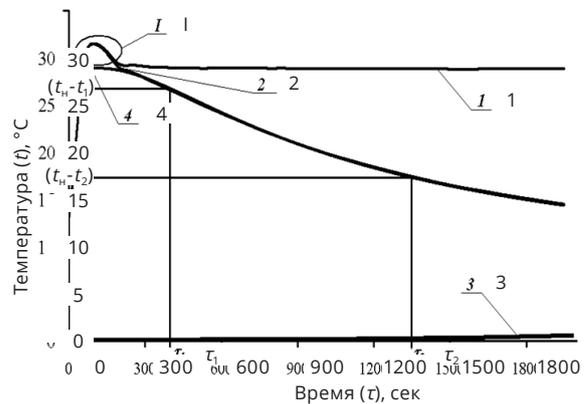


Рисунок 3. Термограммы термометрической системы: 1 – температура нагревателя; 2 – разность температур между нагревателем и буферным слоем; 3 – температура свободной поверхности теплоприемника; 4 – разность температур между нагревателем и буферным слоем, определенная по формуле (7) после определения теплофизических характеристик; 1 – скачок температуры, получаемый при выводе нагревателя на рабочий режим

¹Патент № 2329492 С2 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления : № 2006119890/28 : заявл. 06.06.2006 : опубл. 20.07.2008 / И. А. Короткий, Н. А. Бахтин, М. И. Ибрагимов, Е. А. Николаева; заявитель ГОУ ВПО Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.

Таблица 1

Теплофизические характеристики различных сыров (приведены усредненные значения полученные в сериях экспериментов с не менее чем трехкратной повторностью)

Вид сыра	Теплопроводность λ , Вт/(м×К), $\pm 0,002$ Вт/(м×К)	Температуропроводность α , м ² /с, $\pm 0,01 \times 10^{-7}$ м ² /с	Объёмная Теплоёмкость c_v , МДж/(м ³ ×К) $\pm 0,05 \times$ МДж/(м ³ ×К)	Плотность ρ , кг/м ³ , ± 1 кг/м ³	Массовая теплоёмкость c_m , кДж/(кг×К), $\pm 0,05$ кДж/(кг×К)
Салаирский	0,444	$1,220 \times 10^{-7}$	3,64	1020	3,57
Сосновский	0,439	$1,190 \times 10^{-7}$	3,68	1028	3,58
Сулугуни	0,423	$1,410 \times 10^{-7}$	3,00	1056	2,84
Голандский	0,400	$1,430 \times 10^{-7}$	2,79	1017	2,74
Орловский	0,395	$1,370 \times 10^{-7}$	2,88	1027	2,80
Адыгейский	0,382	$1,120 \times 10^{-7}$	3,41	920	3,71
Чеддер	0,365	$1,494 \times 10^{-7}$	2,44	1228	1,99
Витязь	0,343	$1,200 \times 10^{-7}$	2,86	952	3,00
Российский	0,303	$1,470 \times 10^{-7}$	2,06	965	2,13
Радонежский	0,299	$1,070 \times 10^{-7}$	2,79	1200	2,33
Советский	0,278	$1,510 \times 10^{-7}$	1,84	1211	1,52
Пошехонский	0,252	$1,333 \times 10^{-7}$	1,89	1198	1,58

В ходе проведения экспериментальных исследований была определена взаимосвязь параметров, характеризующих количественный состав сыра – вода и молочный жир от его теплофизических характеристик.

Выявленную взаимосвязь характеризуют уравнения, полученные из анализа экспериментальных данных, которые представляют из себя уравнения регрессии второго порядка, аргументами в которых являются коэффициенты теплопроводности (λ , Вт/(м×К)), температуропроводности (α , м²/с) и плотность (ρ , кг/м³) исследуемого сыра.

Для определения массовой доли воды в сыре (m_{H_2O} , %) предлагается использовать уравнение:

$$m_{H_2O} = -2,54 \times 10^5 \alpha \rho + 0,2767 \lambda \rho + 7,684 \times 10^4 \rho^2 - 1,7291 \rho - 8,07 \times 10^7 \alpha \lambda + 1594,1 \lambda^2 - 1263,8 \lambda + 1137,3 + 6,15 \times 10^8 \alpha - 2,005 \times 10^{15} \alpha^2. \quad (6)$$

Массовую долю молочного жира в сухом веществе (m_G , %) сыра предлагается определять по уравнению

$$m_G = 2,09 \times 10^4 \alpha \rho + 0,1361 \lambda \rho + 2,4937 \times 10^4 \rho^2 - 0,5813 \rho + 5,015 \times 10^7 \alpha \lambda - 100,9 \lambda^2 - 51,59 \lambda + 356,628 - 2,8 \times 10^8 \alpha + 1,335 \times 10^{15} \alpha^2. \quad (7)$$



В таблице 2 представлены массовые доли влаги в сыре и массовые доли молочного жира в сухом веществе, определенные с помощью стандартных физико-химических методов исследования, а также по предлагаемым уравнениям (6) и (7).

Представленные в таблице 2 данные подтверждают возможность использования результатов теплофизических измерений для определения массовых долей влаги и молочного жира в сырах. Различие в данных об этих физико-химических показателях, полученные с помощью стандартных методов исследования и по предлагаемым уравнениям на основании теплофизического исследования составляет менее 1 %.

Выводы

В результате выполнения работы разработана комплексная методика экспериментального определения теплофизических характеристик сыров. Эта методика может быть применена к теплофизическим исследованиям других пищевых продуктов. С помощью вышеизложенной методики определены теплофизические характеристики различных сыров, а также установлена взаимосвязь между теплофизическими характеристиками и компонентным составом сыров. Выявленная взаимосвязь формализована математической моде-



Источник изображения: Freepik.com

Таблица 2

Массовая доля влаги в сыре и молочного жира, определенные по стандартным методикам и по уравнениям (10, 11)

Вид сыра	Массовая доля влаги, %			Массовая доля молочного жира, % (в сухом веществе)		
	ГОСТ 3626-73	формула (6)	отклонение от ГОСТ 3626-73, ($\delta_{н,о}$) %	ГОСТ 5867-90	формула (7)	отклонение от ГОСТ 5867-90, ($\delta_{г}$) %
Салаирский	60,4	60,7	0,51	42,2	42,0	0,44
Сосновский	59,0	58,6	0,68	41,5	41,7	0,41
Сулугуни	46,5	46,7	0,44	44,0	43,9	0,14
Голландский	41,5	41,0	0,90	44,0	44,1	0,27
Орловский	39,9	40,3	0,88	43,2	43,1	0,25
Адыгейский	58,0	58,1	0,16	45,0	45,0	0,04
Чеддер	44,0	43,9	0,14	51,1	51,1	0,00
Витязь	44,7	44,6	0,22	43,2	43,2	0,03
Российский	36,0	36,1	0,14	44,7	44,7	0,05
Радонежский	40,4	40,4	0,12	41,2	41,2	0,10
Советский	32,5	32,6	0,20	45,2	45,1	0,12
Пошехонский	38,1	38,0	0,22	40,2	40,2	0,07

лю, с помощью которой, на основании величин, характеризующих коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, а также плотности сыра можно определить массовую долю влаги и массовую долю молочного жира (в сухом веществе) сыра. Таким образом, разработан экспресс-метод определения компонентного состава сыра по его теплофизическим характеристикам. Новизна данного экспресс-метода заключается в том, имея данные о теплофизических свойствах (теплопроводность α и теплопрово-

дность λ) и физическую плотность сыра ρ можно с высокой степенью точности (по ГОСТ 3626-73 и по ГОСТ 5867-90 для влаги порядка $\delta_{H_2O} = 0,45\%$ и жира $\delta_G = 0,32\%$ соответственно) определить содержание жира и влаги в сыре.

Продолжительность проведения анализа составляет до 30 минут, а обработка полученных данных может быть реализована в автоматическом режиме. Погрешность метода составляет менее 1%. ■

Effect Component Composition on Thermophysical Properties of Protein Products

Igor A. Korotky, Elena V. Korotkaya, Larisa A. Proskuryakova, Denis A. Efremov
Kemerovo State University, Kemerovo

Food additives and substitutes make it possible to model the sensory profile of foods and regulate their nutritional value. As a result, the range of food products grows while their cost goes down. Dairy protein and fat are inherent components of cheese production, which makes them vulnerable to counterfeiting. New food additives must be provided with various objective control methods to determine their actual composition. A thermophysical analysis of protein-fat dairy products, e.g., cheese, determines whether the actual component composition corresponds with the label. The method of two temperature-time intervals is a complex and express analysis that defines the thermophysical properties of cheese. It takes 30 min and processes the data automatically with an error of $\leq 1\%$.

Key words: thermal conductivity, thermal capacity, component composition of cheese, protein, dairy fat

Список литературы

1. **Остроумов, Л. А.** Формирование кислотнoсычужных молочных сгустков с использованием растительного жира / Л. А. Остроумов, Т. Н. Апёнышева, Л. С. Барсукова // Сыроделие и маслоделие. 2014. № 1. С. 46. <https://elibrary.ru/qbjzjz>
2. **Гаврилов, Г. Б.** Установление фальсификации жировой фазы молочной продукции жирами растительного происхождения / Г. Б. Гаврилов [и др.] // Молочная промышленность. 2015. № 8. С. 34–35. <https://elibrary.ru/ubrqqkz>
3. **Топникова, Е. В.** Контроль состава жировой фазы молочных продуктов с целью выявления их фальсификации животными жирами / Е. В. Топникова, Е. С. Данилова, Г. Ю. Заболотин // Сыроделие и маслоделие. 2019. № 1. С. 10–12. <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2019-1-10-12>; <https://elibrary.ru/yuiiux>
4. **Короткий, И. А.** Разработка низкотемпературной технологии извлечения белка из творожной сыворотки / И. А. Короткий [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2020. № 2(155). С. 148–154. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-2-148-154>; <https://elibrary.ru/xjpxqo>
5. **Остроумов, Л. А.** Продукты переработки сыворотки, полученные методами ультрафильтрации и криоконцентрирования / Л. А. Остроумов [и др.] // Молочная промышленность. 2020. № 9. С. 65–67. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-09-65-67>; <https://elibrary.ru/honnwu>
6. **Топникова, Е. В.** Изучение изменения жировой фазы в процессе изготовления сыров / Е. В. Топникова [и др.] // Все о мясе. 2020. № 5S. С. 351–355 <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-351-355>; <https://elibrary.ru/vggknv>
7. **Остроумов, Л. А.** Особенности и перспективы производства мягких сыров / Л. А. Остроумов, И. А. Смирнова, Л. М. Захарова // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 4(39). С. 80–86. <https://elibrary.ru/vbiuqk>
8. **Остроумов, Л. А.** Теплофизические характеристики творога в процессе замораживания / Л. А. Остроумов, И. А. Короткий, Г. Ф. Сахабутдинова // Молочная промышленность. 2019. № 8. С. 56–58. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2019-8-56-58>; <https://elibrary.ru/uquleo>
9. **Остроумов, Л. А.** Метод двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик твердых, жидких и сыпучих пищевых продуктов и материалов / Л. А. Остроумов, И. А. Короткий, М. И. Ибрагимов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2007. № 1. С. 69–71. <https://elibrary.ru/nestur>
10. **Короткий, И. А.** Применение метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических свойств твердых, жидких и сыпучих материалов / И. А. Короткий // Техника и технология пищевых производств. 2009. № 2. С. 37–41. <https://elibrary.ru/kyrumx>
11. **Кондратенко, В. В.** Влияние миграции зоны наименьшего прогревания на кинетику теплофизических процессов пищевых систем / В. В. Кондратенко [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53, № 4. С. 731–741. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2470>; <https://elibrary.ru/yjamgo>
12. **Короткая, Е. В.** Применение метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик бактериальных заквасок / Е. В. Короткая, И. А. Короткий, М. О. Гаврилова // Техника и технология пищевых производств. 2013, № 2 (29). С. 26–31. <https://elibrary.ru/qanqnl>
13. **Короткий, И. А.** Определение теплофизических свойств компонентов плодовоовощной смеси в процессе замораживания / И. А. Короткий, Г. Ф. Сахабутдинова, М. И. Ибрагимов // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 1(40). С. 81–86. <https://elibrary.ru/vrdjdb>
14. **Короткий, И. А.** Определение теплофизических характеристик тропических фруктов для их использования при производстве сухих молочных продуктов / И. А. Короткий [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 2. С. 220–231. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231>; <https://elibrary.ru/moagvh>