УДК 637.136.3

Е.В. Короткая, И.А. Короткий, М.О. Гаврилова

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВУХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАКТЕРИАЛЬНЫХ ЗАКВАСОК

Посвящена исследованиям теплофизических свойств заквасок термофильных молочнокислых микроорганизмов. Исследован химический состав бактериальных заквасок. Изложена методика проведения эксперимента и методика обработки экспериментальных данных для определения теплофизических характеристик бактериальных заквасок при температурах выше криоскопической точки и после окончания процесса замораживания. Приведены измеренные значения теплофизических характеристик исследованных видов заквасок.

Теплофизические характеристики, бактериальные закваски, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость.

Введение

Теплофизические свойства являются базовыми величинами при расчетах технологических процессов, в которых происходит нагревание, охлаждение или замораживание материалов или продуктов, а также при проектировании и подборе технологического оборудования для осуществления такого рода процессов.

Для разработки эффективных и энергосберегающих технологий низкотемпературного консервирования и хранения бактериальных заквасок необходима достоверная и объективная информация об их теплофизических свойствах во всем диапазоне температурного воздействия. Бактериальные закваски представляют собой многокомпонентные полидисперсные гетерогенные системы, содержащие газовые включения. Передача теплоты в таких системах осуществляется теплопроводностью и конвекцией. Соотношения тепловой энергии, переданной теплопроводностью и конвективной составляющей, зависят не только от соотношения компонентов и их фазовых состояний, но и от структуры системы. Поэтому аналитические методики определения теплофизических характеристик, основанные на данных компонентного состава такой системы, дают достаточно приблизительное соответствие теплофизических характеристик, полученных расчетными методами, и их действительных значений. В связи с этим для определения теплофизических характеристик бактериальных заквасок необходимо помимо аналитических методик использовать и экспериментальные способы теплофизических исследований. При этом желательно, чтобы техника измерений и методика обработки экспериментальных данных были достаточно простыми, а сами методики экспериментальных исследований были комплексными – то есть позволяющими определять все теплофизические характеристики в одном эксперименте на одном образце.

Методы двух температурно-временных интервалов относятся к скоростным методам определения теплофизических характеристик, которые позволяют в одном опыте определять температуропроводность ($\boldsymbol{a}$), теплопроводность ($\boldsymbol{\lambda}$), объемную теплоемкость ($\boldsymbol{c_V}$) твердых, жидких, сыпучих материалов при температурах выше и ниже криоскопической точки. Теоретические основы методов двух температурно-временных интервалов изложены в [1].

В связи с вышеизложенным для практического определения теплофизических характеристик бактериальных заквасок был выбран первый буферный метод двух температурно-временных интервалов.

Целью данной работы являлось практическое определение теплофизических характеристик заквасок термофильных молочнокислых микроорганизмов в свежем и замороженном состоянии.

Материалы и методы

Для получения лабораторных заквасок использовали лиофилизированные бактериальные заквасочные культуры производства ООО «Барнаульская биофабрика»: *L. bulgaricus* (БПВ – болгарская палочка вязкая, БПНВ – болгарская палочка невязкая); *L. acidophilus* (АПВ – ацидофильная палочка вязкая, АПНВ – ацидофильная палочка невязкая). В качестве среды культивирования использовали восстановленное сухое обезжиренное молоко, соответствующее требованиям ГОСТ Р 52090-2003, без посторонних привкусов и запахов, не содержащее ингибирующих веществ. Стерилизацию молока проводили в автоклаве (стерилизатор паровой серии DGM модель DGM-500) в течение 10–15 мин при давлении 0,1 МПа и температуре (121±2) °С. Приготовление лабораторной закваски осуществляли в стерильных условиях в боксе БАВ-ПЦР – «Ламинар-С». Лиофилизированные заквасочные культуры вносили в охлажденное до 38÷39 °С стерильное молоко и тщательно перемешивали. Сквашивание молока проводили в термостате ТСО-1/80 СПУ при температуре 40÷41 °С до образования сгустка требуемого качества.

Массовую долю сухого вещества и влаги определяли по ГОСТ 3626-73. Количество белка определяли на анализаторе общего азота/белка RAPID N cube – по методу Дюма, основанном на измерении теплопроводности молекулярного азота. Количество органических кислот определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105М». Метод основан на разделении заряженных компонентов сложной смеси в кварцевом капилляре под действием приложенного электрического поля.

Замораживание бактериальных заквасок производили при температурных режимах: –45, –25 и –10 °С

на воздухе и в хладоносителе (этанол). Для замораживания использовали специальные низкотемпературные камеры.

Исследование теплофизических характеристик молочнокислых заквасок производили первым буферным методом двух температурно-временных интервалов [1].

Результаты и их обсуждение

При проведении исследований теплофизических свойств важными исходными данными является информация о химическом составе исследуемого объекта. Поскольку бактериальные закваски представляют собой многокомпонентный биологический объект, был изучен их химический состав, который определяет пищевую ценность получаемого с использованием этих заквасок кисломолочного продукта, играет определяющую роль в формировании молочнокислого сгустка, а также необходим при исследовании процессов замораживания заквасок.

При исследовании химического состава заквасок молочнокислых бактерий определяли массовую долю сухих веществ, массовую долю общего белка и массовую концентрацию органических кислот. Значения этих показателей представлены в табл. 1.

На основании приведенных данных установлено, что для всех видов заквасок массовая доля общего белка высока и соответствует нормативным требованиям по пищевой ценности кисломолочных продуктов [2, 3]. Необходимо отметить, что различия в полученных значениях массовой доли общего белка, органических кислот и сухих веществ в исследованной группе заквасок находятся в диапазоне погрешности измерений. Следует отметить, что у вязких заквасок АПВ и БПВ содержание молочной кислоты было в среднем в 1,5 раза выше, чем у невязких АПНВ и БПНВ. Массовая доля сухих веществ в исследуемых закваскаx различалась незначительно.

Таблица 1

Химический состав заквасок молочнокислых бактерий

Показатель	Бактериальная закваска			
	АПВ	АПНВ	БПВ	БПНВ
Массовая доля общего белка, % (ε ±0,5 %)	3,1	2,9	3,0	2,9
Массовая концентрация молочной кислоты, мг/см^3 (ε ±0,5 %)	18,7	12,7	16,1	11,5
Массовая доля сухих веществ, % (ε ±0,5 %)	12,5	11,7	12,3	11,2

Как уже отмечалось, исследование теплофизических характеристик молочнокислых заквасок производили первым буферным методом двух температурно-временных интервалов [1]. Принципиальная схема лабораторной установки, предназначенной для определения теплофизических характеристик первым буферным методом двух температурно-временных интервалов, изображена на рис. 1.

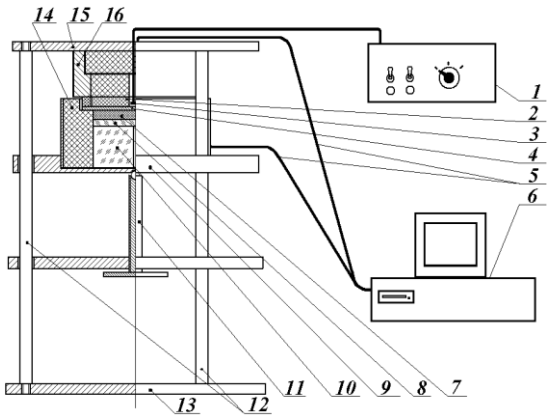

Рис. 1. Схема лабораторного стенда для определения теплофизических характеристик первым буферным методом двух температурно-временных интервалов: 1 – термостатирующее устройство; 2 – медный ТЭН; 3 – термистор с термопарой; 4 – рабочая поверхность нагревателя; 5 – хромель-копелевые термоэлектрические термопреобразователи (термопары); 6 – измерительный комплекс; 7 – исследуемый объект; 8 – буферный слой; 9 – основание теплоприемника; 10 – теплоприемник; 11 – винтовое приспособление; 12 – направляющие стержни (3 штуки); 13 – основание установки; 14 – теплоизоляция теплоприемника; 15 – основание нагревателя; 16 – корпус нагревателя

Измерение температур в ходе теплотехнического эксперимента производится хромель-копелевыми термоэлектрическими преобразователями (термопарами) *5*, одна из которых размещена на рабочей поверхности нагревателя, другая – в теплоприемнике.

Для обеспечения большей достоверности теплотехнического эксперимента необходимо предусмотреть установку дополнительной термопары вблизи от свободного торца теплоприемника, а измерения температур в эксперименте производить до тех пор, пока температура свободного торца теплоприемника остается неизменной. Расстояние между рабочей поверхностью теплоприемника и термопарой называют буферным слоем *8* (рис. 1). Толщина буферного слоя должна быть значительно меньше высоты теплоприемника H ($H >> h_B$, в нашей установке h_B = 5 мм, H = 200 мм). Показания термопар фиксируются измерительным стендом *6*, выполненном на базе персонального компьютера.

Для проведения теплофизических исследований полость *7* лабораторной установки (рис. 1) заполняли жидкой бактериальной закваской. После установки нагревателя *4* термометрическая система термостатировалась в холодильной камере при температуре 0÷2 °С до установления теплового равновесия во всех точках термометрической системы. Момент установления теплового равновесия в термометрической системе определяли по показаниям термопар *5*, которые измеряли температуру поверхности нагревателя, буферного слоя и свободного торца теплоприемника.

Лабораторный стенд, разработанный для определения теплофизических характеристик влагосодержащих материалов, представлен на рис. 2.

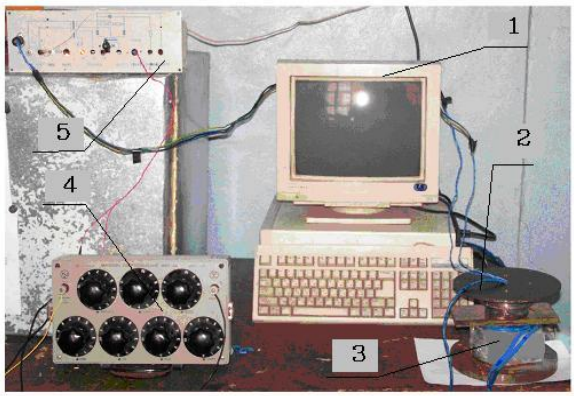

Рис. 2. Лабораторный стенд для определения теплофизических характеристик пищевых продуктов: 1 – измерительный комплекс; 2 – нагреватель; 3 – теплоприемник; 4 – магазин сопротивлений; 5 – термостатирующее устройство

Для определения теплофизических характеристик бактериальных заквасок при температурах выше 0 °С, температуру поверхности нагревателя с помощью термостатирующего устройства (позиция 1, рис. 1; позиция 5, рис. 2) и магазина сопротивлений (позиция 4, рис. 2) задавали в пределах 22÷25 °С.

Определение теплофизических характеристик бактериальных заквасок в замороженном состоянии производили на той же установке, только методика проведения измерений имела некоторые особенности. Подготовленную лабораторную закваску заливали в цилиндрическую латунную обечайку, внутренние размеры которой соответствовали полости *7* лабораторной установки. Обечайка была изготовлена таким образом, чтобы при увеличении объема закваски вследствие замораживания увеличивалась только высота замороженного цилиндра. Затем бактериальную закваску замораживали в обечайке при температуре –25 °С. Полученную замороженную заготовку выдавливали из обечайки, определяли ее вертикальный размер и размещали ее в измерительной полости *7* установки (рис. 1). До того как замороженную закваску разместить в измерительной полости, измерительный комплекс выдерживался при температуре 0÷2 °С, после того, как заготовка помещалась в полость *7*, устанавливался нагреватель, и лабораторную установку помещали в низкотемпературную каскадную холодильную камеру при температуре –50÷–45 °С. За счет того, что лабораторный комплекс обладает достаточно большой тепловой инерцией, контактирующие с поверхностью нагревателя и рабочей поверхностью теплоприемника торцы замороженного образца сначала подтаивали, затем примораживались к этим поверхностям. Таким образом, между образцом и рабочими поверхностями создавался идеальный тепловой контакт. Термометрическая система выдерживалась при температуре –50÷–45 °С до установления теплового равновесия в термометрической системе. При определении теплофизических характеристик замороженных заквасок температура поверхности нагревателя термостатировалась при температуре –22÷–25 °С.

При включении нагревателя происходит интенсивный разогрев его рабочей поверхности до заданной температуры. Теплота от нагревателя через исследуемый материал передается теплоприемнику, температура которого повышается. Температура рабочей поверхности нагревателя, буферного слоя и свободной поверхности теплоприемника регистрируется измерительным комплексом. В результате проведения теплотехнического эксперимента получаются термограммы (рис. 3, 4), анализ которых позволяет определить коэффициенты теплопроводности **λ** и температуропроводности ***a*** исследуемых образцов.

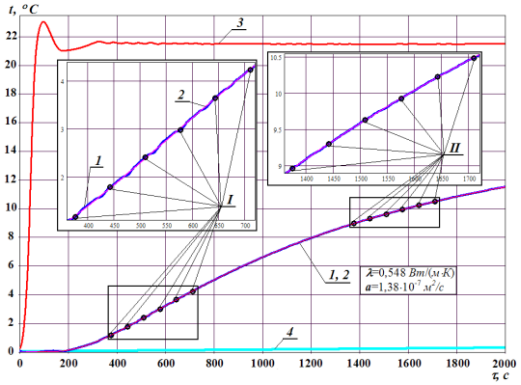

Рис. 3. Экспериментальные зависимости для определения теплофизических характеристик БПНВ при температурах выше 0 °С: 1 – экспериментально полученная температура в буферном слое теплоприемника (***t***); 2 – теоретическая зависимость изменения температуры буферного слоя (t_0), полученная по уже определенным значениям коэффициентов **λ** и ***a***; 3 – температура поверхности нагревателя ($t_н$); 4 – температура свободного торца теплоприемника (t_c); I – первая группа точек для определения коэффициентов **λ** и ***a***; II – вторая группа точек для определения коэффициентов **λ** и ***a***

Рис. 4. Экспериментальные зависимости для определения теплофизических характеристик закваски БПНВ в замороженном состоянии: 1 – экспериментально полученная температура в буферном слое теплоприемника (***t***); 2 – теоретическая зависимость изменения температуры буферного слоя (t_0), полученная по уже определенным значениям коэффициентов **λ** и ***a***; 3 – температура поверхности нагревателя ($t_н$); 4 – температура свободного торца теплоприемника (t_c); I – первая группа точек для определения коэффициентов **λ** и ***a***; II – вторая группа точек для определения коэффициентов **λ** и ***a***

Постоянные теплоприемника определяли решением системы уравнений 1 относительно λ и a.

$$\begin{cases} \dfrac{t_н - t_1}{t_н - t_0} = \left(1 + \dfrac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1}\right) \sum\limits_{i=0}^{3} \left(\left(\dfrac{1 - \lambda/(b\sqrt{a})}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1}\right)^i erfc\left(\dfrac{h}{2\sqrt{a\tau_1}}\left(\dfrac{h_B}{h}\sqrt{\dfrac{a}{a_B}} + 1 + 2\cdot i\right)\right)\right) \\ \dfrac{t_н - t_2}{t_н - t_0} = \left(1 + \dfrac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1}\right) \sum\limits_{i=0}^{3} \left(\left(\dfrac{1 - \lambda/(b\sqrt{a})}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1}\right)^i erfc\left(\dfrac{h}{2\sqrt{a\tau_2}}\left(\dfrac{h_B}{h}\sqrt{\dfrac{a}{a_B}} + 1 + 2\cdot i\right)\right)\right) \end{cases}, \quad (1)$$

где $t_н$ – температура нагревателя, °С; t_1 – температура в буферном слое теплоприемника в момент времени, соответствующий I группе точек (рис. 3, 4), °С; t_0 – температура свободного конца теплоприемника в начальный момент времени, °С; коэффициент теплопроводности исследуемого образца, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности исследуемого образца, м^2/с; b – постоянная теплоприемника, b = 370,7 Вт·с^{0,5}/К; a_B – коэффициент температуропроводности теплоприемника $a_B = 5{,}08\cdot10^{-8}$ м^2/с; h – толщина слоя исследуемого образца, h = 0,0135 м; h_0 – толщина буферного слоя, h_0 = 0,005 м.

Для получения более достоверных значений теплопроводности и температуропроводности исследуемого материала на кривой 1 (рис. 3, 4) выбирали две группы точек (группа I и группа II, рис. 3, 4) в каждой из групп соответственно по шесть точек. Каждая из точек одной группы составляла пару с каждой точкой другой группы. Таким образом, получается 36 систем уравнений вида (1), в каждой из которых определяются значения теплопроводности и температуропроводности исследуемого материала. В качестве окончательных значений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности принимали средние значения этих величин, определенных для каждой пары точек (рис. 5, 6).

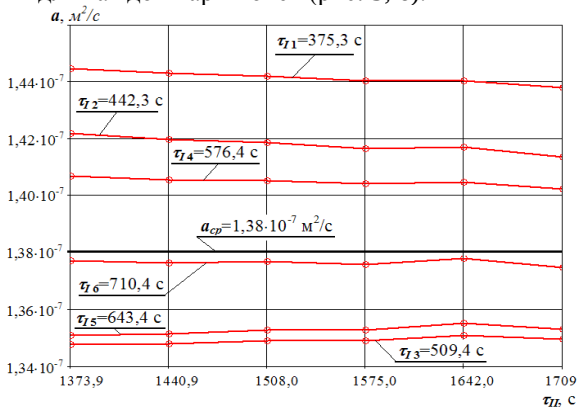

Рис. 5. Определение среднего значения коэффициента температуропроводности закваски БПНВ при температуре выше 0 °С: τ_{Ii} – линии значений коэффициента температуропроводности закваски, определенные с помощью системы уравнений (1), первой координатой в которой является i-е значение первой группы точек

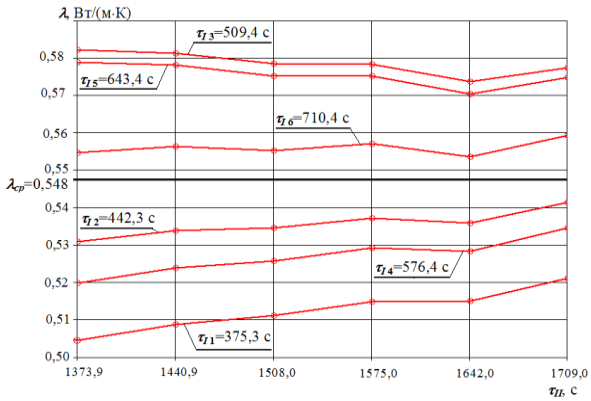

Рис. 6. Определение среднего значения коэффициента теплопроводности закваски БПНВ при температуре выше 0 °С: τ_{Ii} – линии значений коэффициента теплопроводности закваски, определенные с помощью системы уравнений (1), первой координатой в которой является i-е значение первой группы точек

Значения удельной объемной теплоемкости c_v определяли по формуле:

$$c_v = \lambda / a. \quad (2)$$

Массовая теплоемкость c_m исследованных заквасок рассчитывалась по формуле:

$$c_m = \lambda / (a \cdot \rho), \quad (3)$$

где ρ – физическая плотность исследуемого материала.

Определенные с помощью вышеизложенной методики значения теплофизических характеристик исследованных бактериальных заквасок в свежем и замороженном состоянии приведены в табл. 2 и 3.

Из приведенных результатов видно, что значения теплофизических характеристик заквасок в наибольшей степени определяются массовой долей содержащейся в них влаги. При замораживании заквасок теплофизические характеристики значительно изменяются: температуропроводность возрастает в 6÷7 раз, теплопроводность – в 3÷4 раза, теплоемкость уменьшается в 1,5÷1,8 раза.

Таблица 2

Теплофизические характеристики
бактериальных заквасок до замораживания

Закваска	Температуропроводность $a\cdot10^7$, м^2/с ($\bar{X}$ ±5 %)	Теплопроводность λ, Вт/(м·К) ($\bar{X}$ ±5 %)	Объемная теплоемкость $c_V\cdot10^{-6}$, Дж/(м^3·К) ($\bar{X}$ ±5 %)	Плотность ρ, кг/м^3 ($\bar{X}$ ±2 %)	Массовая теплоемкость c_m, Дж/(кг·К) ($\bar{X}$ ±5 %)
АПВ	1,35	0,532	3,93	1032,1	3807
АПНВ	1,35	0,535	3,96	1028,3	3852
БПВ	1,37	0,541	3,95	1029,7	3834
БПНВ	1,38	0,548	3,97	1027,1	3866

Таблица 3

Теплофизические характеристики
замороженных бактериальных заквасок

Закваска	Температуро-проводность $a \cdot 10^7$, м^2/с ($\bar{X}$ ±5 %)	Теплопровод-ность λ, Вт/(м·К) ($\bar{X}$ ±5 %)	Объемная теплоемкость $c_V \cdot 10^{-6}$, Дж/(м^3·К) ($\bar{X}$ ±5 %)	Плотность ρ, кг/м^3 ($\bar{X}$ ±2 %)	Массовая теплоемкость c_m, Дж/(кг·К) ($\bar{X}$ ±5 %)
АПВ	8,78	1,83	2,08	961,0	2168
АПНВ	8,87	1,85	2,09	955,9	2183
БПВ	9,11	1,9	2,08	957,8	2176
БПНВ	9,36	1,95	2,09	954,3	2188

Теплофизические характеристики исследованных заквасок отличаются друг от друга незначительно. Температуропроводность и теплоемкость незамороженных заквасок различаются в пределах 2 %, теплопроводность незамороженных заквасок в – пределах 3 %. Различия в измеренных значениях теплофизических характеристик различных заквасок исследованной группы находятся в диапазоне погрешностей измерения. Это объясняется тем, что закваски очень близки друг к другу по составу и структуре. При проведении теплотехнических расчетов процессов низкотемпературной обработки бактериальных заквасок можно пользоваться усредненными теплофизическими характеристиками замороженных и незамороженных заквасок. Полученные результаты будут иметь точность, соответствующую требованиям, предъявляемым к инженерным расчетам.

Таким образом, первый буферный метод двух температурно-временных интервалов позволяет определять теплофизические характеристики с очень высокой степенью точности. Этот метод является комплексным и скоростным, дает высокую воспроизводимость полученных результатов, а предлагаемая методика позволяет максимально автоматизировать процесс определения теплофизических характеристик.

Список литературы

1. Волькенштейн, В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов / В.С. Волькенштейн. – Л.: Энергия, 1971. – 144 с.
2. Федеральный закон Российской Федерации от 12 июня 2008 г. № 88-ФЗ «Технический регламент на молоко и молочную продукцию». – Режим доступа: // http://www.gost.ru.
3. Химический состав и энергетическая ценность пищевых продуктов: справочник МакКанса и Уддоусона: пер. с англ. / под общ. ред. д-ра мед. наук А.К. Батурина. – СПб.: Профессия, 2006. – 416 с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

E.V. Korotkaya, I.A. Korotkiy, M.O. Gavrilova

APPLICATION OF TWO TEMPERATURE-TIME INTERVALS METHOD FOR DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF BACTERIAL STARTERS

The article is devoted to the investigation of thermophysical characteristics of thermophilic lactic acid starters. The chemical composition of bacterial starter cultures has been determined. The methodology of the experiment and the data processing method for determination of the thermal properties of bacterial starters at temperatures above cryoscopic point and after freezing have been shown. The measured values of thermophysical properties of studied starters are given.

Thermophysical characteristics, bacterial starter, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia.
Phone/fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru