ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-252-260
УДК 664.8.037.5:637.146.21

Оригинальная статья
http://fptt.ru/

Моделирование кристаллизации влаги при замораживании бактериальных заквасок

Е. В. Короткая[1,*], И. А. Короткий[1], К. И. Васильев[2], Л. А. Остроумов[1]

[1] *ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6*

[2] *Министерство сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Кузбасса, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Кузнецкий, 22А*

Дата поступления в редакцию: 06.04.2020
Дата принятия в печать: 29.05.2020

**e-mail: korotkayael@mail.ru*

© Е. В. Короткая, И. А. Короткий, К. И. Васильев, Л. А. Остроумов, 2020

Аннотация.
Введение. Качество кисломолочных продуктов напрямую зависит от используемых бактериальных заквасок, содержащих молочнокислые микроорганизмы. Одним из эффективных способов хранения бактериальных заквасок является замораживание, т. к. позволяет получать культуры не только с высокой выживаемостью, но и максимально сохраненными морфологическими и культуральными свойствами. Изменение фазового состояния воды влияет на химические и биохимические процессы при замораживании заквасок. Исходя из этого, изучение особенностей кристаллизации влаги при замораживании бактериальных заквасок представляет практический интерес.
Объекты и методы исследования. Бактериальные заквасочные культуры *Lactobacillus bulgaricus* и *Lactobacillus acidophilus*. Использовали стандартные методики для определения физико-химических характеристик и первый буферный метод двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик.
Результаты и их обсуждение. Для исследованной группы бактериальных заквасок определены массовые доли общего белка и сухих веществ, содержание молочной кислоты, а также криоскопические температуры и теплофизические характеристики. Установлено, что величины теплофизических характеристик бактериальных заквасок определяются количеством содержащейся в них влаги. Исходя из этого, предложена модель кристаллизации влаги при замораживании бактериальных заквасок, учитывающая содержание лактозы и молочной кислоты. С помощью данной модели рассчитаны криоскопические температуры, значения которых оказались близки к экспериментальным. На основании модели кристаллизации влаги рассчитана продолжительность замораживания, предложена методика расчета теплофизических характеристик и приведенных их значения, рассчитанные по данной методике. Отличия расчетных и экспериментальных значений не превышали 5,3 %.
Выводы. Сравнение экспериментальных и расчетных значений теплофизических характеристик показало их близость и позволило сделать вывод об адекватности предложенной модели кристаллизации влаги при замораживании бактериальных заквасок, а также возможности её практического использования при моделировании процессов замораживания, расчете теплофизических характеристик и продолжительности замораживания.

Ключевые слова: *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*, замораживание, теплоемкость, теплопроводность, плотность

Финансирование. Работа выполнена на базе кафедры теплохладотехники Кемеровского государственного университета.

Для цитирования: Короткая, Е. В. Моделирование кристаллизации влаги при замораживании бактериальных заквасок / Е. В. Короткая, И. А. Короткий, К. И. Васильев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 2. – С. 252–260. DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-252-260.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Modeling of Moisture Crystallization of Bacterial Starter Cultures during Freezing

E.V. Korotkaya[1,*], I.A. Korotkiy[1], K.I. Vasiliev[2], L.A. Ostroumov[1]

[1] *Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia*

[2] Ministry of agriculture and processing industry of Kuzbass,
22A, Kuznetsky Ave., Kemerovo, 650000, Russia

Received: April 06, 2020
Accepted: May 29, 2020

*e-mail: korotkayael@mail.ru

© E.V. Korotkaya, I.A. Korotkiy, K.I. Vasiliev, L.A. Ostroumov, 2020

Abstract.
Introduction. The quality of fermented milk products directly depends on the bacterial starter cultures involved, which contain lactic acid microorganisms. One of the most effective ways to store bacterial ferments is freezing as it improves the survival rate and preserves the morphological and cultural properties. Changing the phase state of water affects the chemical and biochemical processes during freezing. The present research dealt with the issue of moisture crystallization during freezing of bacterial starter cultures.
Study objects and methods. The study featured bacterial starter cultures of *Lactobacillus bulgaricus* and *Lactobacillus acidophilus*. The authors used standard methods to determine their physical and chemical properties; the first buffer method of two temperature and time intervals made it possible to describe the thermal characteristics.
Results and discussion. A set of experiments helped to define the mass fractions of total protein and dry matter, the content of lactic acid, as well as cryoscopic temperatures and thermophysical characteristics of the bacterial cultures in question. The values of the thermophysical characteristics of bacterial ferments proved to depend on the amount of moisture in them. The authors constructed a model of moisture crystallization during freezing of bacterial starter cultures, taking into account the content of lactose and lactic acid. The model made it possible to define the cryoscopic temperatures. Their proved close to the experimental ones. The model of moisture crystallization also provided the freezing time and a method for calculating thermal characteristics and their values. The differences between the calculated and experimental values did not exceed 5.3 %.
Conclusion. The experimental and calculated values of the thermophysical characteristics appeared similar, which means that the proposed model of moisture crystallization during freezing of bacterial ferments proved effective. The model can be used in commercial freezing to calculate thermal characteristics and freezing time.

Keywords. *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*, freezing, heatcapacity, thermalconductivity, density

Funding. The research was performed on the premises of the Department of Heat and Cooling Engineering, Kemerovo State University.

For citation: Korotkaya EV, Korotkiy IA, Vasiliev KI, Ostroumov LA. Modeling of Moisture Crystallization of Bacterial Starter Cultures during Freezing. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(2):252–260. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-252-260.

Введение

Существующие в настоящее время методы консервации бактериальных культур весьма разнообразны. Однако все они основаны на общем принципе – переводе клеток в анабиотическое состояние. В состоянии анабиоза жизненные процессы в организме резко замедляются, что способствует его выживанию в неблагоприятных условиях. Принцип анабиоза лежит в основе замораживания и хранения при низких температурах бактериальных культур, а также их высушивания и хранения в защитной среде.

Сухие бактериальные закваски могут храниться в течение достаточно долгого времени. Однако имеется достаточное количество исследований подтверждающих, что в результате высушивания культуры микроорганизмов утрачивают свои свойства. В настоящее время для длительного хранения бактериальных заквасок широко используются методы лиофилизации и сублимационной сушки как одни из эффективных и экономичных. Необходимо отметить, что в процессе лиофилизации микроорганизмы бактериальных заквасок подвергаются стрессовому воздействию не только низких температур, но и вакуума. В результате возможно появление мутаций, нарушение генетической стабильности и потеря желаемых свойств. Несмотря на это, в сравнении с высушиванием, лиофилизация обеспечивает лучшую стабильность и жизнеспособность микроорганизмов бактериальных заквасок [1].

Криоконсервация – совокупность низкотемпературных методов хранения биологических объектов. Низкотемпературное консервирование бактериальных заквасок осуществляют двумя способами: при температуре –196 °C в жидком азоте и глубоким замораживанием (–30 ± –80 °C) [1]. При температуре хранения ниже –40 °C глубоко замороженные бактериальные закваски сохраняют свою активность в течение нескольких месяцев. К преимуществам данного метода консервации следует отнести удобство хранения и использования в производстве кисломолочной продукции непосредственно после размораживания на водяной бане или после непродолжительной инкубации до достижения необходимой кислотности [1, 2]. Сравнение влияния таких методов консервации, как замораживание и сублимационная сушка, на свойства бактериальных заквасок, содержащих молочнокислые бактерии, показало, что оба

метода консервации оказывают значительное влияние на жизнеспособность микроорганизмов [2–4]. Под действием низких температур скорость ферментативных процессов замедляется, а образование льда и дегидратация способствуют их ускорению. Понижение температуры приводит к частичной денатурации фермента или субстрата, вызывает изменение мембраны клетки, приводит к увеличению вязкости протоплазмы и др. [1, 5]. Особенности и характер этих изменений определяются биологической природой объекта и зависят от таких факторов, как температура, скорость ее понижения, время воздействия, присутствие криопротекторов. Подбор оптимального сочетания криопротекторов, скорости замораживания и температуры оттаивания способны в значительной степени увеличить выживаемость лактобактерий [6–10]. Как показали исследования авторов, после 6 месяцев хранения замороженные бактериальные культуры показали высокую выживаемость и высокую внутриклеточную ферментативную активность по сравнению с культурами сублимационной сушки [3].

Учитывая важность качества используемых в молочной промышленности бактериальных заквасок, которые определяют органолептические и физико-химические свойства, а также биологическую ценность получаемого продукта, задача исследователей состоит в разработке и совершенствовании способов консервации, которые позволят снизить долю отмерших и поврежденных клеток. В этой связи замораживание является одним из эффективных способов хранения бактериальных заквасок. Присутствие воды как основного компонента бактериальных заквасок влияет на теплофизические процессы при их замораживании. Основным фактором, влияющим на химические и биохимические процессы при замораживании бактериальных заквасок, является изменение фазового состояния воды. В процессе замораживания вода, находящаяся внутри бактериальных заквасок, превращается в лед не сразу. Сначала она охлаждается до тех пор, пока температура не станет равна криоскопической, далее начинается замораживание. Изменение фазового состояния воды включает две стадии – зарождение и рост кристаллов. Различают два типа образования зародышей кристаллов льда. Самопроизвольное образование нового кристалла в чистом растворе (гомогенное образование кристаллических зародышей) и образование кристаллических структур вокруг центров кристаллизации (гетерогенное образование кристаллов) [10–12]. Форма и размер образующихся кристаллов льда определяют свойства замороженного продукта. Поэтому контроль образования и роста кристаллов льда является очень важным для определения микроструктуры и качества замороженных пищевых продуктов, в том числе бактериальных заквасок [11–13]. Изучение особенностей кристаллизации влаги при замораживании биоматериалов и пищевых продуктов будет способствовать разработке наиболее эффективных технологий, оказывающих минимальное воздействие на замораживаемый объект, и приведет к повышению качества готового продукта [10].

Современные технологии низкотемпературного консервирования пищевых продуктов должны быть энергосберегающими и научно обоснованными. Знание особенностей низкотемпературного воздействия на пищевые продукты позволяет правильно спроектировать, рассчитать и подобрать технологическое оборудование. Для осуществления таких расчетов необходимо знать как изменяются теплофизические характеристики продуктов во всем диапазоне низкотемпературного воздействия [1, 14]. Исходя из этого, разработка расчетных методик, позволяющих моделировать и прогнозировать изменения значений теплофизических свойств бактериальных заквасок в ходе низкотемпературного воздействия, представляется весьма интересным.

Целью работы является разработка модели замораживания бактериальных заквасок, позволяющая описать процессы кристаллизации влаги, рассчитать теплофизические характеристики и продолжительность замораживания.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» на базе кафедры теплохладотехники. В качестве объектов изучения были выбраны бактериальные заквасочные культуры *Lactobacillus bulgaricus* и *Lactobacillus acidophilus*. Определение физико-химических показателей проводили по стандартным методикам. Массовую долю органических кислот устанавливали методом капиллярного электрофореза, содержание белка – методом Дюма на анализаторе общего азота/белка RAPID N cube. Методом гравиметрии определяли содержание сухих веществ и влаги.

Бактериальные заквасочные культуры замораживали в специальных низкотемпературных камерах на воздухе и в среде хладоносителя (антифриз на основе пропиленгликоля) при температуре –45 °С [14].

Для измерения температур бактериальных заквасок в процессе замораживания использовали хромель-копелевые термоэлектрические преобразователи (термопары), сигнал которых воспринимался аналоговым модулем ввода МВА-8, преобразователем интерфейса АС-4 и фиксировался персональным компьютером.

Изучение процессов кристаллизации при замораживании бактериальных заквасок проводили калориметрически, используя специализированный

лабораторный комплекс, предназначенный для определения криоскопических температур растворов, автоматически поддерживающий заданную разность температур между исследуемым объектом и окружающей средой, что позволяет управлять процессом кристаллизации [1].

Экспериментальное определение теплофизических характеристик бактериальных заквасок проводили первым буферным методом двух температурно-временных интервалов [14].

Удельную теплоемкость бактериальных заквасок (с) рассчитывали по правилу аддитивности:

$$c = \sum_{k=1}^{n} \left(c_k \omega_k \right) \quad (1)$$

где ω_k – массовая доля компонента;

c_k – теплоемкость компонента: воды ($c_в$ = 4,19 кДж/(кг·К)), лактозы ($c_{лак.}$ = 1,315 кДж/(кг·К)), молочной кислоты ($c_{м.к.}$ = 1,295 кДж/(кг·К)), льда ($c_л$ = 2,3 кДж/(кг·К)), прочих компонентов ($c_{пр}$ = 1,214 кДж/(кг·К)).

Для расчета коэффициента теплопроводности использовали формулу Лихтнекера, в основе которой лежит правило аддитивности. Неприменимое в общем случае для расчета коэффициента теплопроводности правило аддитивности для пищевых продуктов позволяет получить расчетные данные с достаточной достоверностью, т. к. коэффициенты теплопроводности компонентов, входящие в состав бактериальных заквасок, являются величинами одного порядка, а сами продукты изотропными [1, 14].

$$\lambda V = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k V_k \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности продукта;

λ_k – коэффициент теплопроводности компонента;

V_k – объем, занимаемый компонентом;

V – полный объем продукта.

Расчетную физическую плотность закваски находили по уравнению [1]:

$$\rho = \sum_{k=1}^{n} \omega_k \Big/ \sum_{k=1}^{n} \frac{\omega_k}{\rho_k} \quad (3)$$

где $\rho_к$ – плотность компонента.

Математическое описание динамики кристаллизации влаги основано на явлении теплопередачи. Доминирующим механизмом образования кристаллов льда в пищевых системах является гетерогенный [10, 15]. В основу решения поставленной задачи была положена классическая формула расчета продолжительности замораживания Р. Планка (τ), с учетом того что замораживаемое тело имеет форму бесконечного прямого цилиндра [16]:

$$\tau = R \cdot \rho \cdot \left(\frac{\Phi q}{t_{кр} - t_{хл}} + \frac{c}{2} \right) \cdot \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4)$$

где R – внешний радиус цилиндра;

q – удельная теплота замораживания;

Ф – коэффициент, учитывающий форму, равный для цилиндра 0,5;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности тела;

$t_{кр}$ и $t_{хл}$ – температуры криоскопическая и хладоносителя соответственно.

Результаты и их обсуждение

Как уже отмечалось выше, при замораживании бактериальных заквасок не только угнетается их рост и размножение микроорганизмов, но и изменяются скорости протекания физиологических процессов. Авторы [5, 18] показали, что культуры Lactobacillus bulgaricus при замораживании испытывают не только холодовой, но и осмотический стресс. В результате происходит деградация клеток. Поэтому соблюдение условий замораживания имеет первостепенное значение для сохранения не только жизнеспособности микроорганизмов, но и для сохранения их морфологических и культуральных свойств. Исследуемые бактериальные закваски содержат молочнокислые бактерии Lactobacillus bulgaricus и Lactobacillus acidophilus, которые являют термофилами. Термофильные бактерии по-разному переносят действие низких температур, в частности L. bulgaricus и L. acidophilus достаточно хорошо переносят глубокое замораживание [1–3, 5, 18–20]. Исходя из этого, для замораживания бактериальных заквасок была выбрана температура –45 °С.

Бактериальные закваски представляют собой сложную многокомпонентную систему, поэтому предварительно был изучен их химический состав, который играет важную роль в формировании молочного сгустка, а также необходим при изучении процессов замораживания бактериальных заквасок. Значения основных показателей химического состава бактериальных заквасок представлены в таблице 1.

Как видно из данных таблицы 1, общее содержание органических кислот в пересчете на молочную кислоту в бактериальных закваскаx *L. acidophilus* было незначительно выше, чем в бактериальных закваскаx *L. bulgaricus*. В среднем на 2,5 мг/см^3. Близкие значения массовой доли общего белка и сухих веществ (отличия в переделах погрешности измерений) также были отмечены в исследуемых бактериальных закваскаx.

Таблица 1. Некоторые показатели химического состава бактериальных заквасок

Table 1. Chemical composition of bacterial starter cultures

Показатель	Бактериальная культура	
	L. acidophilus	*L. bulgaricus*
Массовая доля общего белка, % ($\overline{X} \pm 0{,}5$)	3,1	3,0
Массовая концентрация молочной кислоты, мг/см^3 ($\overline{X} \pm 0{,}5$)	18,7	16,1
Массовая доля сухих веществ, % ($\overline{X} \pm 0{,}1$)	12,5	12,3

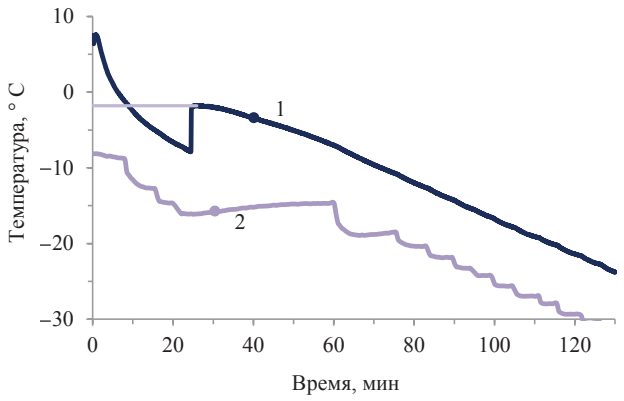

Рисунок 1. Кривые охлаждения: 1 – бактериальной закваски *Lactobacillus acidophilus*; 2 – хладоносителя

Figure 1. Cooling curves: 1 – bacterial starter culture *Lactobacillus acidophilus*; 2 – coolant

Криоскопические температуры бактериальных заквасок определяли термографически по кривым охлаждения (рис. 1 и 2). Температуры замерзания бактериальных заквасок, содержащих *L. acidophilus* и *L. bulgaricus*, составили –1,80 °С и –1,65 °С соответственно.

Экспериментальные значения теплофизических характеристик исследуемых заквасок, определенные первым буферным методом двух температурно-временных интервалов, приведены в таблице 2 [14].

Определенные экспериментально теплофизические характеристики исследуемых бактериальных заквасок имеют близкие значения, т. к. их величина определяется содержанием основных компонентов, наибольшую часть из которых составляет влага.

Учитывая вышесказанное, при разработке модели замораживания бактериальных заквасок, содержащих молочнокислые микроорганизмы, исходили из того, что кристаллизацию влаги можно представить

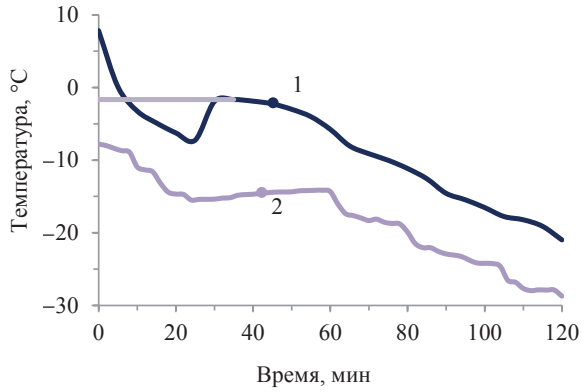

Рисунок 2. Кривые охлаждения: 1 – бактериальной закваски *Lactobacillus bulgaricus*; 2 – хладоносителя

Figure 2. Cooling curves: 1 – bacterial starter culture *Lactobacillus bulgaricus*; 2 – coolant

Таблица 2. Теплофизические характеристики (экспериментальные/расчетные) бактериальных заквасок до замораживания

Table 2. Thermophysical characteristics (experimental/calculated) of bacterial starter cultures before freezing

Бактериальная культура	Удельная теплоемкость с, Дж/(кг·К) ($\bar{X}$ ± 5 %)	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К) ($\bar{X}$ ± 5 %)	Плотность ρ, кг/м³ ($\bar{X}$ ± 2 %)
L. acidophilus	3807/3827	0,532/0,560	1032,1/1049
L. bulgaricus	3834/3695	0,541/0,560	1029,7/1063

как кристаллизацию тройной системы: молочная кислота – лактоза – вода. Фазовые диаграммы состояния для бинарных растворов (молочная кислота – вода и лактоза – вода) будут иметь схожий вид, отличающийся значениями эвтектических концентраций и температур. Для раствора молочной кислоты эвтектическая концентрация равна 40 %, а эвтектическая температура –5,3 °С, для раствора лактозы – 51,4 % и –21 °С соответственно.

Экспериментальным путем определили температуры начала кристаллизации в тройной системе молочная кислота – лактоза – вода в зависимости от концентрации растворов. Полученные данные обработали с помощью метода наименьших квадратов и получили уравнение регрессии для расчета криоскопической температуры ($t_{кр}$, °С):

$$t_{кр} = 0{,}0168 - 0{,}168\omega_к + 1{,}765\times10^{-3}\omega_к^2 - 6{,}044\times10^{-5}\omega_к^3 \quad (5)$$

где $\omega_к$ – массовая доля растворенных компонентов (молочная кислота, лактоза), %.

Среднеквадратичное отклонение температуры замерзания, рассчитанное по уравнению (5), от экспериментальных значений в диапазоне измерений от 0 до –21 °С составило 0,11.

Массовую долю льда ($\omega_л$), образующегося в результате замораживания бактериальных заквасок, в зависимости от температуры, определяли по формуле:

$$\omega_л(t) = \omega_{вл} - \omega_с\times(1/(\omega_к(t)-1)) \quad (6)$$

где $\omega_л(t)$ – массовая доля образовавшегося льда при температуре (t);

$\omega_{вл}$ – массовая доля влаги в исходной закваске;

$\omega_с$ – массовая доля лактозы и молочной кислоты.

Формула (6) может быть использована в диапазоне температур от начала кристаллизации раствора до эвтектической температуры раствора лактозы. При проведении расчетов необходимо учитывать изменение концентрации молочной кислоты и лактозы в растворе. На первом этапе замораживания до достижения первой эвтектической температуры в растворе присутствуют оба компонента и потому в формулу подставляют концентрацию

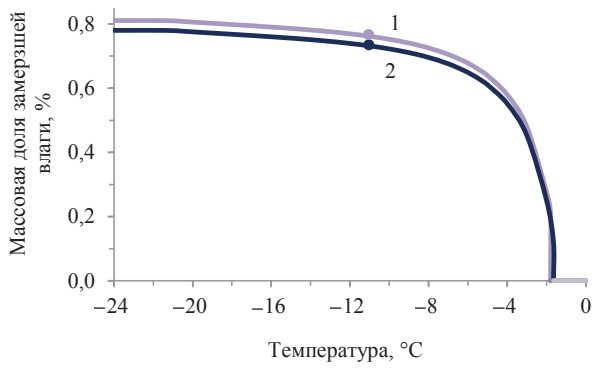

Рисунок 3. Зависимость массовой доли замерзшей влаги от температуры в бактериальных заквасках: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

Figure 3. Effect of temperature on the mass fraction of frozen moisture in bacterial starter cultures: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

молочной кислоты и лактозы. На втором этапе при температурах ниже –5,3 °С вся молочная кислота кристаллизуется и в растворе присутствует только лактоза. При достижении второй эвтектической температуры в жидком виде остается еще 1–3 % незамерзающей влаги.

Используя формулы (5) и (6), была построена зависимость изменения массовой доли замерзшей влаги в диапазоне температур от 0 до –24 °С (рис. 3).

С помощью формул (1)–(3) были рассчитаны удельные теплоемкости, коэффициенты теплопроводности и плотность исследуемых бактериальных заквасок в диапазоне температур от 25 до –45 °С. Полученные зависимости представлены на рисунках 4–6.

Для оценки адекватности разработанной методики были рассчитаны величины теплофизических

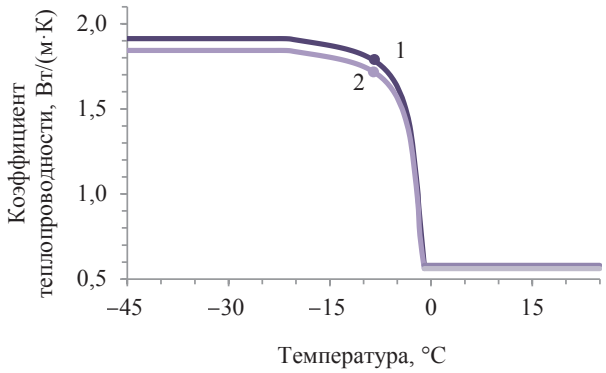

Рисунок 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

Figure 4. Effect of temperature on the coefficient of thermal conductivity: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – Lactobacillus bulgaricus

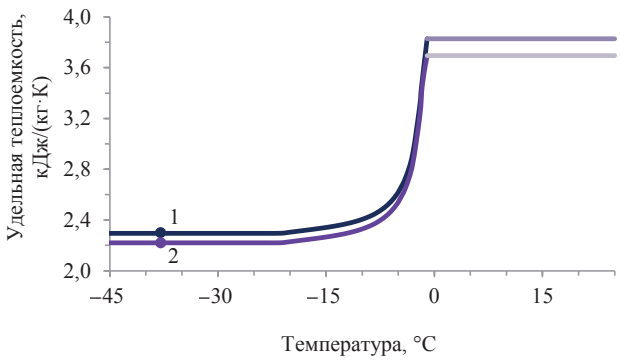

Рисунок 5. Зависимость удельной теплоемкости от температуры: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

Figure 5. Effect of temperature on specific heat: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

характеристик бактериальных заквасок (табл. 2) и проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений. Отличия экспериментальных и расчетных значений составили: для коэффициента теплопроводности – 3,5–5,3 %; удельной теплоемкости – 0,5–3,8 %; плотности – 1,6–3,2 %, для криоскопических температур – 5,2 %.

Решение вопроса о продолжительности замораживания является одним из самых сложных в теплофизике замораживания из-за большого числа факторов, влияющих на процесс замораживания. Для решения задачи о продолжительности замораживания нами была использована формула Р. Планка (4). Расчетные значения продолжительности замораживания бактериальных заквасок составили 2,8 мин, что практически совпадает со средними экспериментальными значениями – 2,9 мин.

Выводы

Предложенная модель замораживания бактериальных заквасок, содержащих молочнокислые

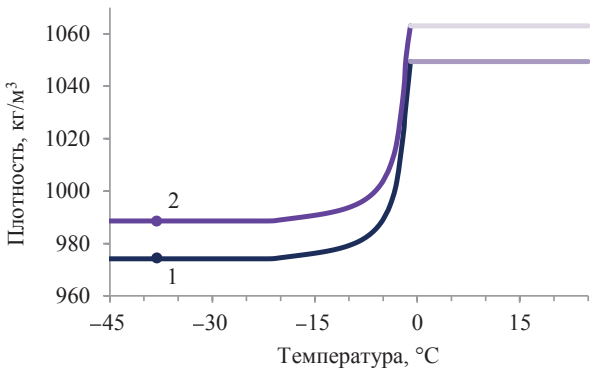

Рисунок 6. Зависимость плотности от температуры: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

Figure 6. Effect of temperature on density: 1 – *Lactobacillus acidophilus*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*

бактерии *Lactobacillus bulgaricus* и *Lactobacillus acidophilus*, позволяет рассчитать массовую долю образующихся кристаллов льда, температуру начала кристаллизации, а также теплофизические характеристики (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплота замораживания, коэффициент теплоотдачи) и продолжительность замораживания. Максимальная погрешность измерений при определении теплофизических характеристик составила 5,3 %, при определении продолжительности замораживания погрешность составила 3,6 %, что позволяет считать предложенную модель адекватной. Данная модель может быть использована при моделировании замораживания жидких бактериальных заквасок.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors bear equal responsibility for the content of the article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Короткая, Е. В. Исследование генетической стабильности молочнокислых микроорганизмов при замораживании и низкотемпературном хранении: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.18.04 / Короткая Елена Валерьевна. – Кемерово, 2012. – 42 с.

2. Ананьина, А. Е. Криоконсервирование производственных штаммов пробиотиков *Bifidobacterium bifidum* 1 и *Lactobacillus bulgaricus* 1Z 03501 в различных защитных средах / А. Е. Ананьина, А. В. Щеглов, И. П. Высеканцев // Проблемы криобиологии. – 2012. – Т. 22, № 3. – С. 359.

3. Kandil, S. Influence of freezing and freeze drying on intracellular enzymatic activity and autolytic properties of some lactic acid bacterial strains / S. Kandil, M. E. Soda // Advances in Microbiology. – 2015. – Vol. 5, № 6. – P. 371–382. DOI: https://doi.org/10.4236/aim.2015.56039.

4. Effect of acids produced from carbohydrate metabolism in cryoprotectants on the viability of freeze-dried *Lactobacillus* and prediction of optimal initial cell concentration / S. Cui, F. Hang, X. M. Liu [et al.] // Journal of Bioscience and Bioengineering. – 2018. – Vol. 125, № 5. – P. 513–518. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.12.009.

5. Subcellular membrane fluidity of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* under cold and osmotic stress / J. Meneghel, S. Passot, S. Cenard [et al.] // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 101, № 18. – P. 6907–6917. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-017-8444-9.

6. Optimal combination of multiple cryoprotectants and freezing-thawing conditions for high lactobacilli survival rate during freezing and frozen storage / G. Q. Wang, X. Q. Yu, Z. Lu [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 99. – P. 217–223. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.065.

7. Shelf-life extension of freeze-dried *Lactobacillus brevis* WiKim0069 using supercooling pretreatment / I. S. Choi, S. H. Ko, H. M. Kim [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 112. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.128.

8. Survival and stability of *Lactobacillus fermentum* and *Wickerhamomyces anomalus* strains upon lyophilisation with different cryoprotectant agents / R. F. Stefanello, E. H. Nabeshima, B. T. Iamanaka [et al.] // Food Research International. – 2019. – Vol. 115. – P. 90–94. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.044.

9. Spray drying of *Lactobacillus rhamnosus* GG with calcium-containing protectant for enhanced viability / Y. W. Su, X. F. Zheng, Q. Zhao [et al.] // Powder Technology. – 2019. – Vol. 358. – P. 87–94. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.082.

10. Kiani, H. Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review / H. Kiani, D.-W. Sun // Trends in Food Science and Technology. – 2011. – Vol. 22, № 8. – P. 407–426. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.04.011.

11. Modelling freezing processes of high concentrated systems / E. Lopez-Quiroga, R. Wang, O. Gouseti [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48, № 1. – P. 749–754. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.140.

12. Crystallisation in concentrated systems: A modelling approach / E. Lopez-Quiroga, R. Wang, O. Gouseti [et al.] // Food and Bioproducts Processing. – 2016. – Vol. 100. – P. 525–534. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.007.

13. Aguilera, J. M. Why food microstructure? / J. M. Aguilera // Journal of Food Engineering. – 2005. – Vol. 67, № 1–2. – P. 3–11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050.

14. Короткий, И. А. Исследование теплофизических характеристик пищевых продуктов: монография / И. А. Короткий, А. Н. Расщепкин. – Кемерово : Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2016. – 146 с.

15. Zaritzky, N. Physical-chemical principles in freezing / N. Zaritzky // Handbook of frozen food packaging and processing / D.-W. Sun. – Boca Raton : CRC Press, 2006. – P. 3–37.

16. Консервирование пищевых продуктов холодом / И. А. Рогов, В. Е. Куцакова, В. И. Филиппов [и др.]. – М. : Колос, 1999. – 176 с.

17. Characterization of freeze-dried *Lactobacillus acidophilus* in goat milk powder and tablet: Optimization of the composite cryoprotectants and evaluation of storage stability at different temperature / G. W. Shu, Z. Wang, L. Chen [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 90. – P. 70–76. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.013.

18. Biophysical characterization of the *Lactobacillus delbrueckii* subsp. bulgaricus membrane during cold and osmotic stress and its relevance for cryopreservation / J. Meneghel, S. Passot, S. Dupont [et al.] // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 101, № 4. – P. 1427–1441. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-016-7935-4.

19. Fonseca, F. Operating conditions that affect the resistance of lactic acid bacteria to freezing and frozen storage / F. Fonseca, C. Béal, G. Corrieu // Cryobiology. – 2001. – Vol. 43, № 3. – P. 189–198. DOI: https://doi.org/10.1006/cryo.2001.2343.

20. A Survey on the survival of *Lactobacillus paracasei* in fermented and non-fermented frozen soy dessert / S. Norouzi, H. Pourjafar, F. Ansari [et al.] // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2019. – Vol. 21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101297.

References

1. Korotkaya EV. Issledovanie geneticheskoj stabil'nosti molochnokislyh mikroorganizmov pri zamorazhivanii i nizkotemperaturnom hranenii [A study of the genetic stability of lactic acid microorganisms during freezing and low-temperature storage]. Dr. eng. sci. diss. Kemerovo: Kemerovo Technological Institute of Food Industry; 2012. 42 p.

2. Ananyina AE, Shcheglov AV, Vysekantsev IP. Cryopreservation of production strains of probiotics *Bifidobacterium bifidum* 1 and *Lactobacillus bulgaricus* 1Z 03501 in different cryoprotective media. Problems of cryobiology. 2012;22(3):359. (In Russ.).

3. Kandil S, Soda ME. Influence of freezing and freeze drying on intracellular enzymatic activity and autolytic properties of some lactic acid bacterial strains. Advances in Microbiology. 2015;5(6):371–382. DOI: https://doi.org/10.4236/aim.2015.56039.

4. Cui S, Hang F, Liu XM, Xu ZY, Liu ZM, Zhao JX, et al. Effect of acids produced from carbohydrate metabolism in cryoprotectants on the viability of freeze-dried *Lactobacillus* and prediction of optimal initial cell concentration. Journal of Bioscience and Bioengineering. 2018;125(5):513–518. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.12.009.

5. Meneghel J, Passot S, Cenard S, Refregiers M, Jamme F, Fonseca F. Subcellular membrane fluidity of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* under cold and osmotic stress. Applied Microbiology and Biotechnology. 2017;101(18):6907–6917. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-017-8444-9.

6. Wang GQ, Yu XQ, Lu Z, Yang YT, Xia YJ, Lai PFH, et al. Optimal combination of multiple cryoprotectants and freezing-thawing conditions for high lactobacilli survival rate during freezing and frozen storage. LWT – Food Science and Technology. 2019;99:217–223. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.065.

7. Choi IS, Ko SH, Kim HM, Chun HH, Lee KH, Yang JE, et al. Shelf-life extension of freeze-dried *Lactobacillus brevis* WiKim0069 using supercooling pretreatment. LWT – Food Science and Technology. 2019;112. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.128.

8. Stefanello RF, Nabeshima EH, Iamanaka BT, Ludwig A, Fries LLM, Bernardi AO, et al. Survival and stability of *Lactobacillus fermentum* and *Wickerhamomyces anomalus* strains upon lyophilisation with different cryoprotectant agents. Food Research International. 2019;115:90–94. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.044.

9. Su YW, Zheng XF, Zhao Q, Fu N, Xiong H, Wu WD, et al. Spray drying of *Lactobacillus rhamnosus* GG with calcium-containing protectant for enhanced viability. Powder Technology. 2019;358:87–94. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.082.

10. Kiani H, Sun D-W. Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. Trends in Food Science and Technology. 2011;22(8):407–426. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.04.011.

11. Lopez-Quiroga E, Wang R, Gouseti O, Fryer PJ, Bakalis S. Modelling freezing processes of high concentrated systems. IFAC-PapersOnLine. 2015;48(1):749–754. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.140.

12. Lopez-Quiroga E, Wang R, Gouseti O, Fryer PJ, Bakalis S. Crystallisation in concentrated systems: A modelling approach. Food and Bioproducts Processing. 2016;100:525–534. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.007.

13. Aguilera JM. Why food microstructure? Journal of Food Engineering. 2005;67(1–2):3–11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050.

14. Korotkij IA, Rasshchepkin AN. Issledovanie teplofizicheskih harakteristik pishchevyh produktov: monografiya [A study of thermophysical characteristics of food products: monograph]. Kemerovo: Kemerovo Technological Institute of Food Industry; 2016. 146 p. (In Russ.).

15. Zaritzky N. Physical-chemical principles in freezing. In: Sun D-W, editor. Handbook of frozen food packaging and processing. Boca Raton: CRC Press; 2006. pp. 3–37.

16. Rogov IA, Kucakova VE, Filippov VI, Frolov SV. Konservirovanie pishchevyh produktov holodom [Food preservation by cold]. Moscow: Kolos; 1999. 176 p. (In Russ.).

17. Shu GW, Wang Z, Chen L, Wan HC, Chen H. Characterization of freeze-dried *Lactobacillus acidophilus* in goat milk powder and tablet: Optimization of the composite cryoprotectants and evaluation of storage stability at different temperature. LWT – Food Science and Technology. 2018;90:70–76. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.013.

18. Meneghel J, Passot S, Dupont S, Fonseca F. Biophysical characterization of the *Lactobacillus delbrueckii* subsp. bulgaricus membrane during cold and osmotic stress and its relevance for cryopreservation. Applied Microbiology and Biotechnology. 2017;101(4):1427–1441. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-016-7935-4.

19. Fonseca F, Béal C, Corrieu G. Operating conditions that affect the resistance of lactic acid bacteria to freezing and frozen storage. Cryobiology. 2001;43(3):189–198. DOI: https://doi.org/10.1006/cryo.2001.2343.

20. Norouzi S, Pourjafar H, Ansari F, Homayouni A. A Survey on the survival of *Lactobacillus paracasei* in fermented and non-fermented frozen soy dessert. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2019;21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101297.

Сведения об авторах

Короткая Елена Валерьевна
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры общей и неорганической химии, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (983) 216-58-53, e-mail: korotkayael@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6210-3756

Короткий Игорь Алексеевич
д-р техн. наук, профессор, директор Института электронных образовательных коммуникаций, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (983) 216-58-54, e-mail: krot69l@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7623-0940

Васильев Кирилл Иванович
канд. техн. наук, заместитель министра сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Кузбасса, Министерство сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Кузбасса, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Кузнецкий, 22А, тел.: +7 (961) 727-44-20, e-mail: depselhoz@list.ru

Остроумов Лев Александрович
д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-73, e-mail: bionano_kem@mail.ru

Information about the authors

Elena V. Korotkaya
Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (983) 216-5853, e-mail: korotkayael@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6210-3756

Igor A. Korotkiy
Dr.Sci.(Eng.), Professor, Director of the Institute of Electronic Educational Communications, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (983) 216-58-54, e-mail: krot69l@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7623-0940

Kirill I. Vasiliev
Cand.Sci.(Eng.), Deputy Minister of Agriculture and Processing Industry of Kuzbass, Ministry of agriculture and processing industry of Kuzbass, 22A, Kuznetsky Ave., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (961) 727-44-20, e-mail: depselhoz@list.ru

Lev A. Ostroumov
Dr.Sci.(Eng.), Professor, Leading Researcher of the Scientific and Educational Center, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-73, e-mail: bionano_kem@mail.ru