Научная статья
УДК 637.352
DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-20-30

Влияние консорциума микроорганизмов на структурно-механические свойства ферментированных сгустков при производстве мягких кисломолочных сыров

К.А. Холобова*, О.В. Анистратова

Калининградский государственный технический университет
Калининград, Россия, *kkholobova@mail.ru

Аннотация. Исследовали влияние микробного консорциума закваски, включающего пробиотическую микрофлору, на структурно-механические характеристики ферментированных сгустков, используемых для производства мягких кисломолочных сыров с целью определения их реологических параметров, дающих возможность дальнейшего моделирования технологических процессов производства данной группы молочной продукции. Объектами исследования стали образцы молочных сгустков, полученных путем ферментации нормализованной смеси консорциумом микроорганизмов, включающих молочнокислые культуры (*Streptococcus salivarius sp. thermophilus, Lactobacillus delbrueckii sp. bulgaricus)* и пропионовокислые культуры *(P. freudenreichii subsp. shermanii*) в различных соотношениях. Физико-химические показатели сырья и нормализованной смеси определяли на анализаторе «Лактан 1-4 М», окончание процесса ферментации устанавливали путем фиксации титруемой и активной кислотности, измеряемых общепринятыми инструментальными методами. Реологические характеристики испытуемых образцов определяли при помощи ротационного вискозиметра Brukfield DV-II + Pro при скоростях 5–100 $с^{-1}$, шпиндель RV-3, при температуре сгустков (20 ± 1)°С. Получены данные по влиянию различных температур пастеризации (75 ± 1), (85 ± 1), (95 ± 1)°С и различных соотношений молочнокислых и пропионокислых бактерий (1:1; 1:2; 1:3; 1:4; 1:5) на реологические свойства полученных образцов. Изучены результаты эффективной вязкости объектов исследования, подобраны математические модели реологического поведения образцов, полученные сгустки классифицированы по их структуре как псевдопластичные жидкости, определены регрессионные уравнения зависимостей эффективной вязкости от градиента скорости сдвига, найдены зависимости скорости разрушения структуры сгустков, дана характеристика темпу разрушения структуры, а также определена тиксотропность сгустков, позволяющая выделить сгустки с меньшим количеством коагуляционно-тиксотропных связей, что способствует лучшему отделению сыворотки в процессе производства кисломолочных сыров.

Ключевые слова: мягкий сыр; кислотный сгусток; эффективная вязкость; скорость сдвига; коэффициент тиксотропности; скорость разрушения структуры

Original article

Influence of a consortium of microorganisms on the structural and mechanical properties of fermented curds for the production of soft fermented milk cheeses

Ksenia A. Kholobova*, Oksana V. Anistratova

Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad, Russia, *kkholobova@mail.ru

Abstract. The influence of the microbial consortium of starter culture, including probiotic microflora, on the structural and mechanical characteristics of fermented curds used for the production of soft fermented milk cheeses was investigated in order to determine their rheological parameters, which makes it possible to further simulate the technological processes of production for this group of dairy products. The objects of the study were samples of milk clots obtained by fermentation of a normalized mixture by a consortium of microorganisms, including lactic acid cultures (*Streptococcus salivarius sp. Thermophiles* and *Lactobacillus delbrueckii sp. bulgaricus*) and propionic acid cultures (*P. freudenreichii subsp. shermanii*) in different proportions. The physicochemical parameters of the raw material and the normalized mixture were determined on Laktan 1-4 M analyzer, the end of the fermentation process was determined by fixing the titratable and active acidity, measured by conventional instrumental methods. The rheological characteristics of the test samples were determined using Brukfield DV-II + Pro rotational viscometer at the speeds of 5–100 s^{-1}, spindle RV-3, at a clot temperature (20 ± 1)°C. Data were obtained on the effect of various pasteurization temperatures (75 ± 1)°C, (85 ± 1)°C, (95 ± 1)°C, as well as various ratios of lactic acid and propionic acid bacteria (1:1; 1:2; 1:3; 1:4; 1:5) on the rheological properties of the obtained samples. The results of the effective viscosity of the objects of study were analyzed, mathematical models of the rheological behavior of the samples were selected, the resulting clumps were classified according to their structure as pseudoplastic liquids, the regression equations for the dependences

of the effective viscosity on the shear rate gradient were determined, the dependences of the rate of destruction of the clump structure were found, the rate of destruction of the structure was characterized, and the thixotropy of the clots was determined, which makes it possible to isolate clots with a smaller amount of coagulation-thixotropic bonds, which contributes to a better separation of whey during the production of fermented milk cheeses.
Keywords: soft cheese; acid curd; effective viscosity; shear rate; thixotropy coefficient; rate of structure destruction

Введение

Мягкие сыры являются перспективным сегментом переработки молока-сырья. В настоящий момент отмечается тенденция российского рынка по наращиванию данного производства, что обусловлено высоким спросом со стороны потребителей. При этом данная группа молочной продукции требует меньших затрат времени и ресурсов, чем представители твердых и полутвердых сыров. Вместе с тем, ассортимент мягких сыров, вырабатываемых непосредственно кислотным способом, крайне ограничен и сводится к производству в условиях небольших сыроварен.

Весомую роль среди прочих качественных характеристик, в том числе определяющих выбор потребителя, играет консистенция сыров. О консистенции продуктов питания можно судить по совокупности их реологических характеристик, определяемых структурным типом и механическими свойствами продукта. Таким образом, изучение структурно-механических свойств исследуемых объектов является неотъемлемым этапом разработки новых видов продукции, позволяющим правильно смоделировать технологический процесс их производства.

Сегодня в производстве пищевой продукции намечен тренд на создание новой обогащенной, функциональной пищевой продукции массового потребления, которая будет способствовать формированию здорового типа питания населения. Исследования по разработке сыров пробиотической направленности, в основу производства которых положены различные микробные консорциумы: молочнокислых, бифидобактерий, пропионовокислых бактерий, а также способы получения сыров: кислотно-сычужный, плавление ведутся как в нашей стране [1–3], так и за рубежом [4–6].

Структурно-механические свойства молочных продуктов были рассмотрены в работах таких ученых, как А.Н. Абрамова, В.А. Арета, Л.П. Брусиловского, В.И. Ганиной, А.В. Горбатова, К.К. Горбатовой, Н.И. Дунченко, В.А. Ересько, З.С. Зобковой, С.В. Карпычева, Н.С. Королевой, В.Д. Косого, Я.И. Костина, Н.Н. Липатова, А.М. Маслова, С.А. Мачихина, Ю.А. Мачихина, В.В. Молочникова, Л.К. Николаева, Р. Раманаускас, Ю.А. Оленева, В.В. Павловой, К.К. Полянского, В.Ф. Семенихиной, В.П. Табачникова, В.Г. Тинякова, Н.Н. Фильчаковой, А.М. Шалыгиной, В.П. Шидловской, В.Д. Харитонова, а также Б. Дроке, И. Кемпебела, А. Крата, Н. Чойшнера, Р. Хаамма и др.

Академик П.А. Ребиндер отмечал, что без знания реологических свойств пищевых систем невозможно не только изучение закономерностей их образования, но и, что особенно важно, обоснование оптимальных параметров технологии на современном уровне [7].

Качество кисломолочных сыров во многом определяется свойствами сгустка, образующегося в процессе ферментации молока-сырья. Чтобы обеспечить получение необходимых показателей продукта, сгусток должен быть достаточно прочным, но не грубым.

Кислотный сгусток имеет вязкоэластичные свойства: при воздействии напряжений он обладает тягучестью и эластичной деформацией. Эластичными называют тела, способные под воздействием внешних сил к большим остаточным деформациям, которые исчезают после снятия нагрузки не сразу, а в течение определенного времени; вязкость характеризует способность тел сопротивляться перемещению одного слоя по отношению к другому под воздействием внешних сил [8].

Сгустки, полученные кислотным способом, обладают одновременно необратимо разрушающимися и тиксотропными связями и имеют структуру смешанного типа – коагуляционно-конденсационные [9]. Для мягких сыров важно преобладание конденсационных структур, способствующих более легкому отделению сыворотки, с меньшим количеством коагуляционно-тиксотропных связей.

Механические свойства определяются химическим составом продукта, взаимосвязью компонентов друг с другом, количеством и прочностью связей между ними, т.е. составом и структурой, в связи с чем эти свойства называют структурно-механическими. Количественно они характеризуются реологическими показателями. Структурно-механические характеристики, в том числе вязкость, во многом определяются

видом вносимой закваски [10].

К сожалению, в настоящее время в литературных источниках приводятся реологические данные, разнящиеся в своих количественных показателях в зависимости от используемых приборов и условий измерений [11], кроме того, в связи с разработкой новых видов продукции, требуется проведение исследований по определению и систематизации их реологических параметров.

Целью данной работы явилось исследование структурно-механических характеристик молочных сгустков мягких кислотных сыров, полученных путем ферментации нормализованной смеси консорциумом микроорганизмов, включающих пробиотическую микрофлору.

Задачи исследования:

- ✓ получить данные об эффективной вязкости молочных сгустков;
- ✓ классифицировать полученные ферментированные сгустки по их структуре;
- ✓ определить тиксотропность и кинематические характеристики полученных образцов.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследований, проводимых на кафедре Калининградского государственного технического университета, служили образцы молочных сгустков для производства мягкого сыра пробиотической направленности, полученные путем заквашивания нормализованной молочной смеси консорциумом микроорганизмов (*Streptococcus salivarius sp. thermophilus, Lactobacillus delbrueckii sp. bulgaricus* и *P. freudenreichii subsp. shermanii*) (опытные образцы) в различных соотношениях, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Соотношение микроорганизмов консорциума в опытных образцах
Table 1. The ratio of consortium microorganisms in prototypes

Наименование образца	Соотношение *Streptococcus salivarius sp. thermophilus, Lactobacillus delbrueckii sp. bulgaricus : P. freudenreichii subsp. shermanii*
образец 1	1:1
образец 2	1:2
образец 3	1:3
образец 4	1:4
образец 5	1:5

Контрольные образцы были получены путем сквашивания чистыми культурами молочнокислых (контроль 1) или пропионовокислых микроорганизмов (контроль 2).

В качестве сырья и функционально необходимых компонентов при получении образцов использовались: молоко коровье сырое, закваска прямого внесения, содержащая *Streptococcus salivarius sp. thermophilus, Lactobacillus delbrueckii sp. bulgaricus* (производство Genesis Laboratories), закваска пропионовокислых бактерий концентрированная жидкая прямого внесения, содержащая *P. freudenreichii subsp. shermanii* КМ-186, которые по показателям качества и безопасности соответствовали требованиям Технических регламентов для данных видов продукции.

Физико-химические показатели сырья и нормализованной смеси: массовую долю жира, сухой обезжиренный молочный остаток (СОМО), массовую долю белка, плотность определяли на анализаторе качества молока «Лактан 1-4 М» в соответствии с инструкцией. Нормализованная молочная смесь имела следующие показатели: массовая доля жира составила 2,5%, белка – 3,2%, СОМО – 8,8%, плотность – 1030 г/см^3, pH 6,63, кислотность 18°Т. Пастеризацию нормализованной смеси проводили при температурах (75 ± 1), (85 ± 1) и (95 ± 1)°С.

Закваски предварительно активизировали из концентратов и вносили из расчета 5% к массе нормализованной смеси в различном соотношении, термостатировали при температуре (37 ± 1)°С. Окончание процесса сквашивания устанавливали по достижению показателей активной кислотности 4,6–4,8 и титруемой кислотности сгустков 80 ± 1,2°Т [12]. Реологические характеристики испытуемых образцов ферментированных сгустков в зависимости от соотношения микроорганизмов закваски и температуры пастеризации нормализованной смеси определяли при помощи ротационного

вискозиметра Brukfield DV-II + Pro при скоростях 5–100 $с^{-1}$ с использованием шпинделя RV-3 при температуре сгустков (20 ± 1)°С [13].

Результаты и их обсуждение

Существует множество классификаций биотехнологических сред по их структуре. Принадлежность молочных продуктов к тому или иному виду «идеального» реологического тела может быть определена путем обработки экспериментальных данных и построения зависимость показателей вязкости от скорости сдвига (кривые течения), которая считается основной характеристикой структурно-механических свойств дисперсных систем, описывающей равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке.

Изучив характер кривых течения, а также получив уравнения зависимостей эффективной вязкости от скорости сдвига (таблица 2), было установлено, что все они описываются степенной (гиперболической) функцией общего вида

$$\eta = B_0 \cdot \gamma^{-m},$$

где η – эффективная вязкость при определенных значениях градиента скорости;

B_0 – эффективная вязкость при единичном значении относительного (безразмерного) градиента скорости γ;

m – темп разрушения структуры.

Таблица 2. Уравнения зависимости эффективной вязкости образцов кислотных молочных сгустков с различным соотношением заквасочных культур от градиента скорости сдвига и температуры пастеризации нормализованной смеси

Table 2. Equations for the dependency of the effective viscosity of acid milk curd samples with different ratios of starter cultures on the shear rate gradient and pasteurization temperature of the normalized mixture

Температура пастеризации нормализованной смеси, °С	Исследуемый объект	Уравнение	Коэффициент детерминации	Темп разрушения структуры
(75 ± 1)	контроль 1	$y = 14565 \cdot x^{-0,726}$	0,9808	0,909
	образец 1	$y = 23931 \cdot x^{-0,816}$	0,9901	0,950
	образец 2	$y = 21194 \cdot x^{-0,802}$	0,9890	0,960
	образец 3	$y = 18506 \cdot x^{-0,787}$	0,9873	0,989
	образец 4	$y = 23861 \cdot x^{-0,852}$	0,9783	0,993
	образец 5	$y = 18245 \cdot x^{-0,704}$	0,9907	0,999
	контроль 2	$y = 20681 \cdot x^{-0,747}$	0,9852	0,942
(85 ± 1)	контроль 1	$y = 14565 \cdot x^{-0,726}$	0,9808	0,726
	образец 1	$y = 23931 \cdot x^{-0,816}$	0,9901	0,816
	образец 2	$y = 17571 \cdot x^{-0,731}$	0,9160	0,731
	образец 3	$y = 18506 \cdot x^{-0,787}$	0,9873	0,787
	образец 4	$y = 23861 \cdot x^{-0,852}$	0,9783	0,852
	образец 5	$y = 18245 \cdot x^{-0,704}$	0,9907	0,704
	контроль 2	$y = 20681 \cdot x^{-0,747}$	0,9852	0,747
(95 ± 1)	контроль 1	$y = 48339 \cdot x^{-0,937}$	0,9808	0,937
	образец 1	$y = 39821 \cdot x^{-0,921}$	0,9901	0,921
	образец 2	$y = 31823 \cdot x^{-0,966}$	0,9160	0,966
	образец 3	$y = 40834 \cdot x^{-0,924}$	0,9873	0,924
	образец 4	$y = 42102 \cdot x^{-0,842}$	0,9783	0,842
	образец 5	$y = 41910 \cdot x^{-0,886}$	0,9907	0,886
	контроль 2	$y = 46769 \cdot x^{-0,911}$	0,9852	0,911

В ходе обработки данных было установлено, что величины достоверности аппроксимации всех уравнений приближены к 1, что говорит о точности математического описания имеющихся данных.

Из таблицы 2 следует, что все полученные зависимости имели общую закономерность $-1 < m < 0$,

что свидетельствует о том, что независимо от температуры пастеризации и соотношений заквасочных культур, все изучаемые объекты относятся к псевдопластичным (аномально вязким) неньютоновским жидкостям.

В ходе эксперимента изменение реологических свойств молочных сгустков оценивалось по динамике их эффективной вязкости в зависимости от градиента скорости сдвига (рисунки 1–3). Определено, что различие в соотношениях заквасочных культур молочнокислых и пропионовокислых микроорганизмов, а также температура пастеризации нормализованной смеси оказывают влияние на изучаемые свойства образцов. Анализ экспериментальных данных показал, что вязкость сгустков увеличивается с повышением температуры пастеризации нормализованной смеси. Это объясняется тем, что применение более высоких температур тепловой обработки вызывает денатурацию сывороточных белков, приводит к вовлечению их в сгусток и образованию более прочной структуры [8].

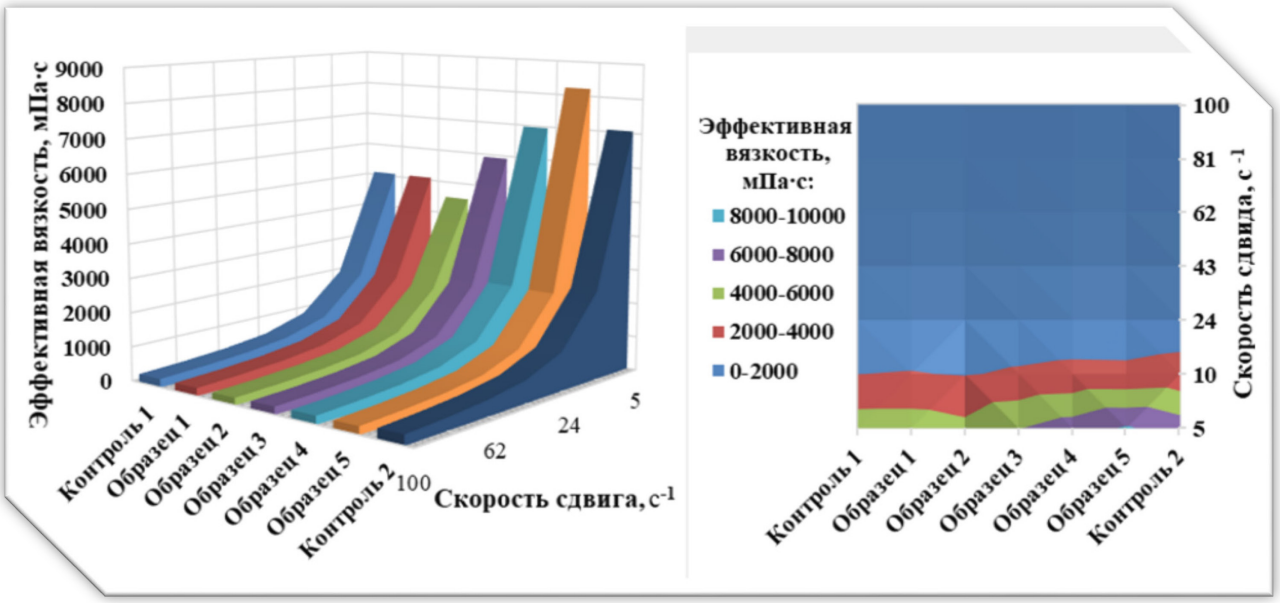


Рисунок 1 – Зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига в образцах (пастеризация нормализованной смеси при (75 ± 1)°С)

Figure 1. Dependence of the effective viscosity on the shear rate gradient in the samples (pasteurization of the normalized mixture at (75 ± 1) ° C)

Так, наибольшее значение вязкости при скорости сдвига 5 $с^{-1}$ и температуре пастеризации (75 ± 1)°С имели образец 5 (8,2 Па·с), образец 4 (6,9 Па·с) и образец 3 (5,9 Па·с), наименьшее – образец 2 (4,5 Па·с) (рисунок 3). Вязкость всех опытных образцов (кроме образца 5) в начальный момент разрушения структуры была ниже, чем контрольных. Так образец, обладающий наименьшей вязкостью, имел вязкость на 11,0% ниже, чем контрольный образец, содержащий чистые культуры молочнокислых микроорганизмов, и на 36,0% ниже, чем контрольный образец, содержащий чистые культуры пропионовокислых микроорганизмов. Образец, обладающий наибольшей вязкостью, показал значения на 16,4% выше относительно образцов контроль 2 и на 70% выше контроль 1. Среди данной группы образцов наименьший темп разрушения структуры был отмечен у образцов 1–2.

Из рисунка 2 следует, что в начале разрушения структуры наибольшее значение вязкости при температуре пастеризации (85 ± 1)°С имели образец 4 (8,6 Па·с), образец 3 (8,2 Па·с) и образец 5 (7,2 Па·с), наименьшее – образец 2 (6,2 Па·с). Сравнительная оценка реологических свойств опытных и контрольных образцов показала, что вязкость всех опытных образцов (кроме образца 2) в начальный момент разрушения структуры была выше, чем контрольных. Так, образец с соотношением заквасочных культур 1:2 имел вязкость на 23,0% выше вязкости образца контроль 1 и на 8,1% ниже вязкости образца контроль 2. К образцам, обладающим наименьшим темпом разрушением структуры, в данном случае относятся образцы 5 и 2.

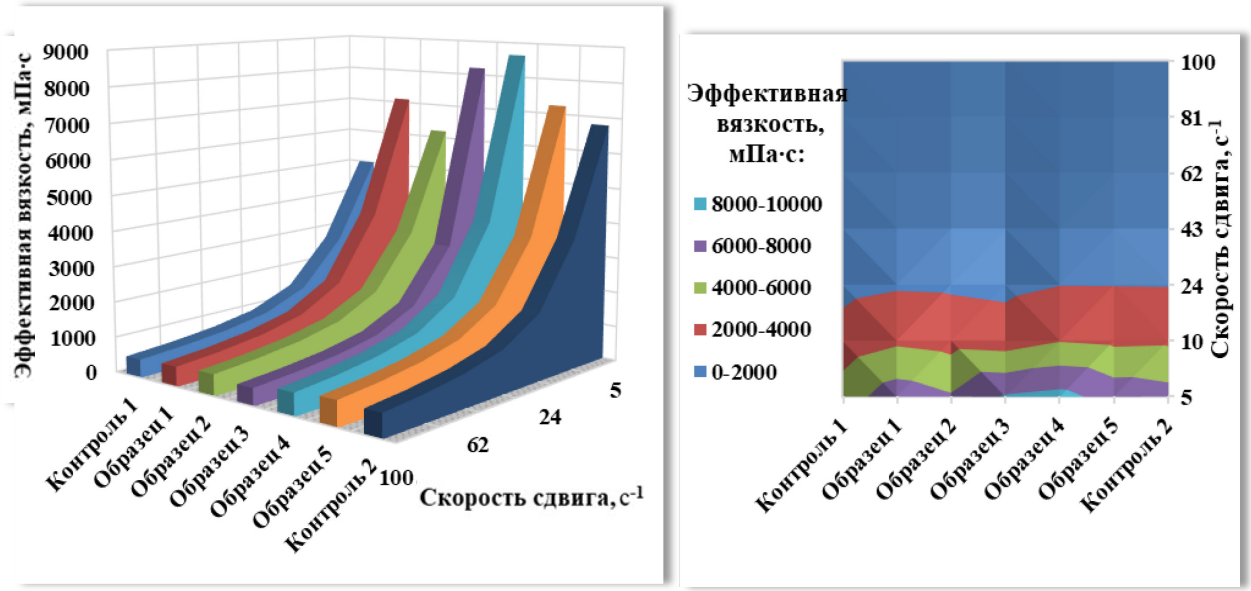


Рисунок 2 – Зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига в образцах (пастеризация нормализованной смеси при (85 ± 1)°С)

Figure 2. Dependence of the effective viscosity on the shear rate gradient in the samples (pasteurization of the normalized mixture at (85 ± 1)°C)

Данные, представленные на рисунке 3, говорят о том, что начальные значения эффективной вязкости были наибольшими у образца 4 (13,9 Па·с), образца 5 (13,3 Па·с) и образца 3 (13,0 Па·с), наименьшими – у образца 2 (10,2 Па·с). Вязкость всех опытных образцов при скорости сдвига 5 $с^{-1}$ была ниже на 13,7% (образец 5) – 37,7% (образец 2) вязкости образца контроль 1 и на 7,7% (образец 5) – 35,6% (образец 2) вязкости образца контроль 2. Темп разрушения структуры имел наименьшие значения у образцов 4 и 5.

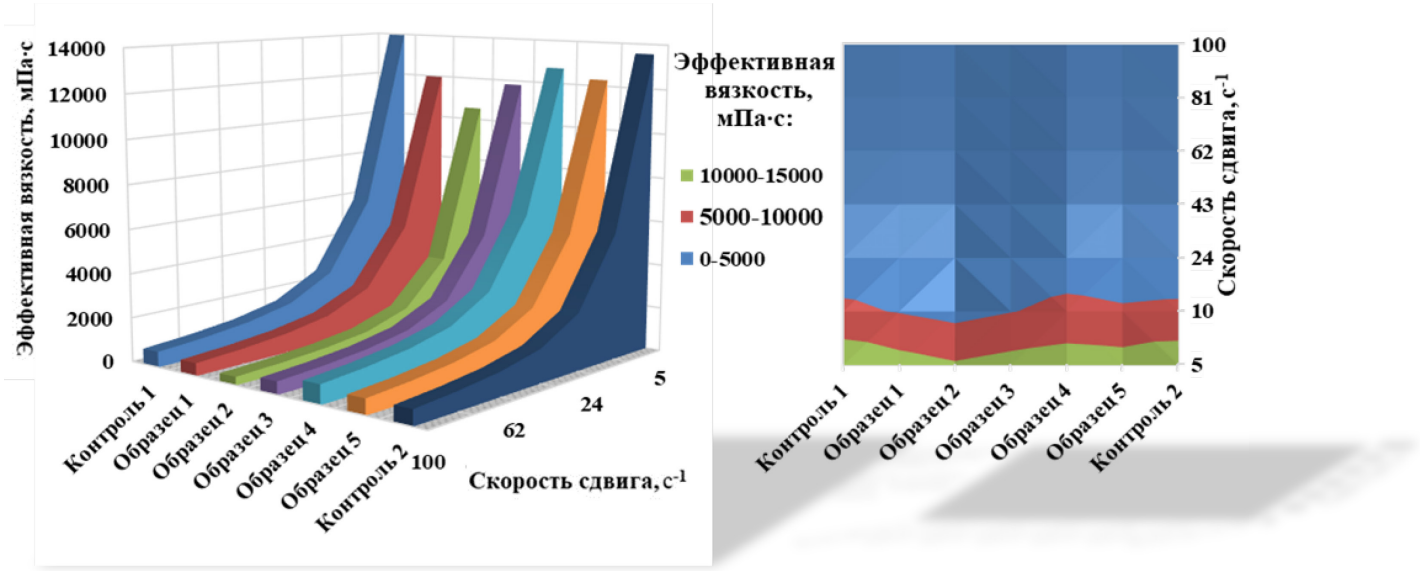


Рисунок 3 – Зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига в образцах (пастеризация нормализованной смеси при (95 ± 1)°С)

Figure 3. Dependence of the effective viscosity on the shear rate gradient in the samples (pasteurization of the normalized mixture at (95 ± 1)°C)

Установлено, что исследуемые образцы с общей температурой пастеризованной смеси имеют незначительные отличия показателя вязкости с увеличением скорости сдвига, разнясь лишь значениями эффективной вязкости при небольших скоростях. Такое уменьшение вязкости псевдопластичных систем может быть объяснено разрушением структурной сетки и агрегатов частиц с ориентацией последних вдоль вектора скорости [10].

Обработка результатов исследования позволила определить кинематические характеристики уровня разрушения структуры полученных кислотных сгустков. Скорость разрушения структуры определялась как первая производная от изменения эффективной вязкости кислотных сгустков [14]. Результаты математических преобразований с целью получения уравнений этой кинематической характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики структурированности кислотных молочных сгустков
Table 3. Characteristics of structuring of acid milk clots

Температура пастеризации нормализованной смеси, °С	Исследуемый объект	Уравнение	Коэффициент тиксотропности
(75 ± 1)	контроль 1	$y = -14651 \cdot x^{-1,909}$	1,36
	образец 1	$y = -17530 \cdot x^{-1,950}$	1,14
	образец 2	$y = -16736 \cdot x^{-1,960}$	1,23
	образец 3	$y = -21043 \cdot x^{-1,989}$	1,20
	образец 4	$y = -23186 \cdot x^{-1,993}$	1,27
	образец 5	$y = -23372 \cdot x^{-1,999}$	1,52
	контроль 2	$y = -21390 \cdot x^{-1,942}$	1,17
(85 ± 1)	контроль 1	$y = -10574 \cdot x^{-1,726}$	1,04
	образец 1	$y = -19528 \cdot x^{-1,816}$	1,33
	образец 2	$y = -12844 \cdot x^{-1,731}$	1,09
	образец 3	$y = -14564 \cdot x^{-1,787}$	1,44
	образец 4	$y = -20330 \cdot x^{-1,852}$	1,26
	образец 5	$y = -2844 \cdot x^{-1,704}$	1,15
	контроль 2	$y = -42607 \cdot x^{-1,911}$	1,26
(95 ± 1)	контроль 1	$y = -45294 \cdot x^{-1,937}$	1,37
	образец 1	$y = -36675 \cdot x^{-1,921}$	1,18
	образец 2	$y = -30741 \cdot x^{-1,966}$	1,30
	образец 3	$y = -37730 \cdot x^{-1,924}$	1,24
	образец 4	$y = -35450 \cdot x^{-1,842}$	1,21
	образец 5	$y = -37132 \cdot x^{-1,886}$	1,33
	контроль 2	$y = -42607 \cdot x^{-1,911}$	1,26

Исходя из полученных уравнений, были рассчитаны численные значения скоростей разрушения структур полученных сгустков в зависимости от конкретных скоростей сдвига: 5; 10; 24; 43; 62; 81; 100 $с^{-1}$, представленные графически на рисунках 4–6.

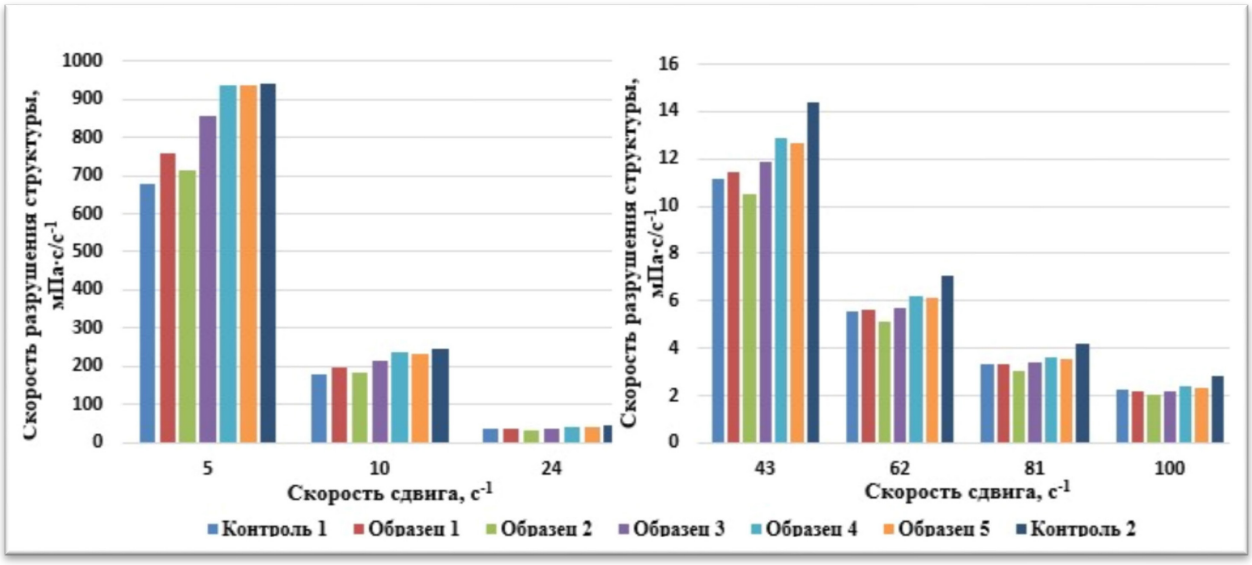


Рисунок 4 – Скорость разрушения структуры образцов (пастеризация нормализованной смеси при (75 ± 1)°С
Figure 4. The rate of destruction of the samples' structure (pasteurization of the normalized mixture at (75 ± 1)°C

Из рисунка 4 видно, что наибольшая скорость разрушения среди опытных образцов наблюдается при скорости сдвига 5 $с^{-1}$ у образцов 5 и 4, наименьшая у образца 2. Максимальной скоростью разрушения при данной скорости сдвига обладает образец контроль 2, наименьшей – контроль 1.

С ростом скорости сдвига до 10 $с^{-1}$ происходит снижение скорости разрушения структур в 3,8–3,9 раз относительно начала разрушения. При достижении скорости 24 $с^{-1}$ скорость разрушения увеличивается в 5,3–5,7 раз относительно скорости 10 $с^{-1}$; при переходе скорости с 24 до 43 $с^{-1}$ разрушение структуры увеличивает скорость в 3,1–3,3 раза; в интервале скоростей (62–100) $с^{-1}$ скорость разрушения увеличивается уже не так значительно (в 1,5–2 раза) при переходе с одной скорости к другой.

Кинематические данные, полученные для образцов молочных сгустков, имеющих температуру пастеризации нормализованной смеси (85 ± 1)°С, представлены на рисунке 5. Наибольшая скорость разрушения структуры среди опытных образцов отмечена при скорости сдвига 5 $с^{-1}$ у образца 1, наименьшая у образца 2. В интервалах скоростей сдвига 10–24 и с 24–43 $с^{-1}$ увеличение скорости разрушение образцов происходило в 3,3–3,5 и 4,0–4,6 раз соответственно. Дальнейшее увеличение скоростей сдвига приводило к замедлению скорости разрушения структуры сгустков.

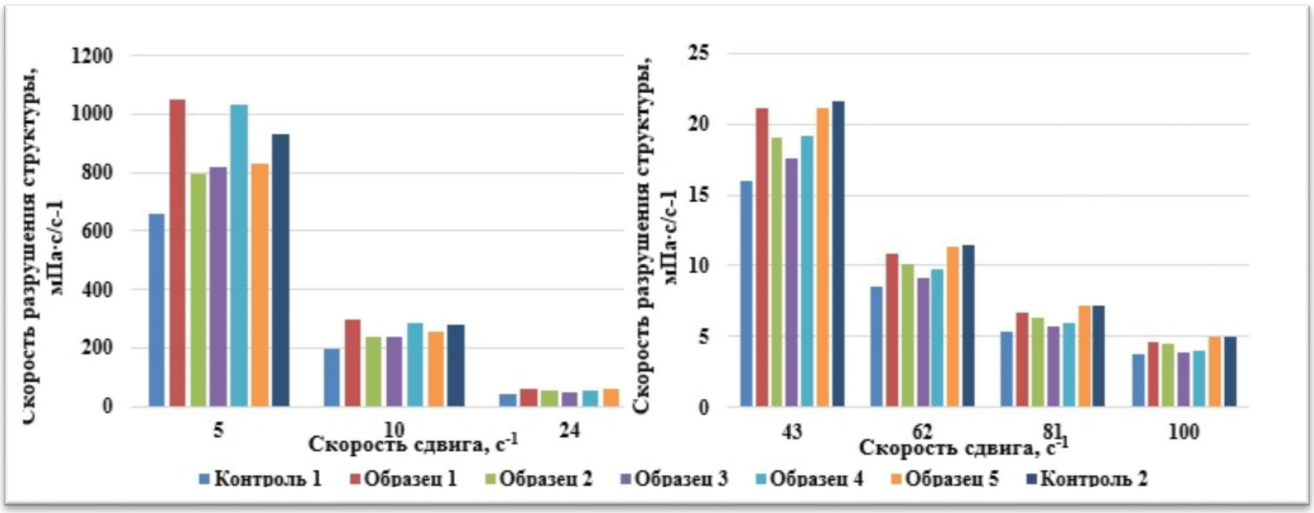


Рисунок 5 – Скорость разрушения структуры образцов (пастеризация нормализованной смеси при (85 ± 1)°С
Figure 5. The rate of destruction of the samples' structure (pasteurization of the normalized mixture at (85 ± 1)°C

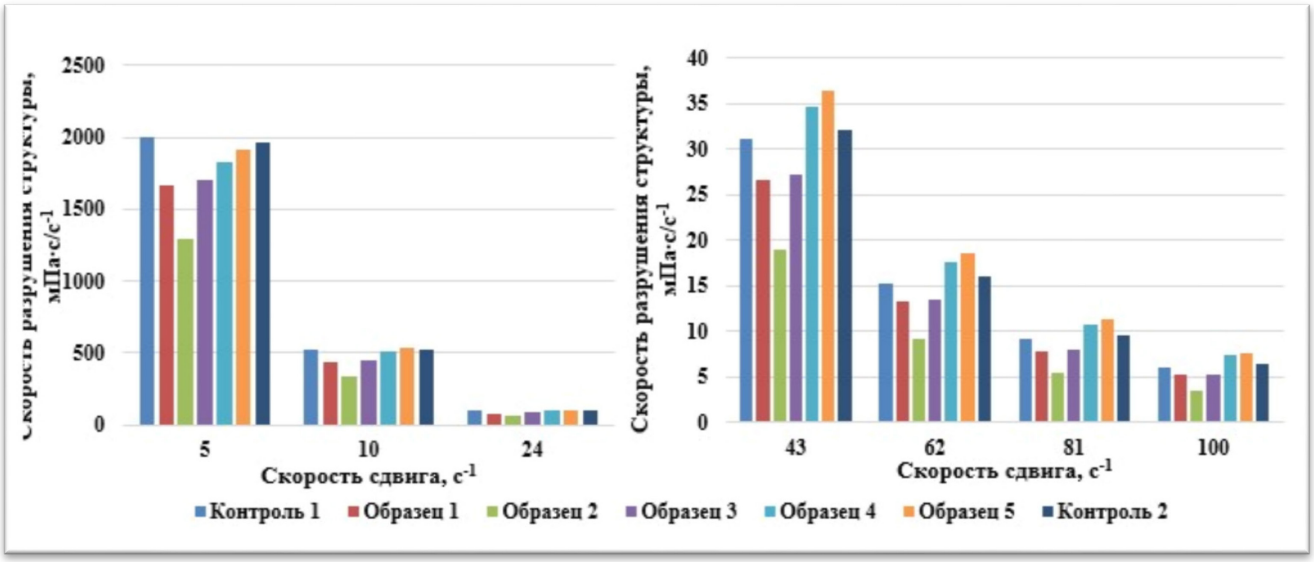


Рисунок 6 – Скорость разрушения структуры образцов (пастеризация нормализованной смеси при (95 ± 1)°С
Figure 6. The rate of destruction of the samples' structure (pasteurization of the normalized mixture at (95 ± 1)°C

Рисунок 6 отражает скорость разрушения структуры образцов с температурой термической обработки исходной молочной смеси (95 ± 1)°С. Максимальной скоростью разрушения среди опытных

образцов при скорости сдвига 5 $с^{-1}$ обладает образец 5, наименьшей – образец 2. Максимальной скоростью разрушения при данной скорости сдвига обладает образец контроль 1, наименьшей – образец 2. С ростом скорости сдвига до 10 $с^{-1}$ скорость разрушения увеличивается в 3,6–3,9 раз относительно начала разрушения. Далее при переходе со скорости сдвига с 10 до 24 $с^{-1}$ и с 24 до 43 $с^{-1}$ скорость разрушения увеличивается в 5,0–5,6 и 3,0–3,1 раза соответственно, аналогично с образцами, имеющими температуру пастеризации нормализованной смеси (85 ± 1)°С, в интервале скоростей (62–100) $с^{-1}$ скорость разрушения увеличивается не так значительно (в 1,6–2 раза) при переходе с одной скорости к другой.

Обобщив данные, можно утверждать, что разрушение структуры молочных сгустков, а значит и уменьшение эффективной вязкости происходит в два этапа: лавинообразно – при скорости сдвига от 5 до 43 $с^{-1}$; от 43 $с^{-1}$ и далее – с затухающей скоростью.

В ходе исследования реологические кривые рассматривались как при нагрузке, так и при разгрузке. В частности, изучалась способность структур самопроизвольно восстанавливаться после разрушения в результате механического воздействия, характеризующаяся коэффициентом тиксотропности (таблица 3), который определяется отношением вязкости системы при разрушении структуры к вязкости этой системы при восстановлении структуры [15].

Из таблицы 3 видно, что наименьшей тиксотропностью среди исследуемых образцов в зависимости от соотношения заквасочных культур и температуры пастеризации смеси обладает образец 3, наибольшей – образец 2 (при температуре пастеризации (85 ± 1)°С). При температурах пастеризации (95 ± 1) и (75 ± 1)°С наибольшей тиксотропностью обладает образец 1, наименьшей – образец 5.

Заключение

Проведенные исследования способствовали получению данных о реологических свойствах сгустков, используемых для производства пробиотических мягких сыров, полученных при ферментации нормализованной молочной смеси консорциумом молочнокислых и пропионовокислых бактерий. Анализ данных показал, что исследуемые объекты относятся к псевдопластичным жидкостям. В ходе работы были подобраны математические модели реологического поведения образцов, определены регрессионные уравнения полученных зависимостей эффективной вязкости от градиента скорости сдвига, найдены зависимости скорости разрушения структуры сгустков, дана характеристика темпу разрушения структуры, а также определена тиксотропность сгустков. Было установлено, что с повышением температуры пастеризации, вязкость ферментированных сгустков возрастает, также значительное влияние оказывает соотношение рассматриваемых микроорганизмов закваски (*Streptococcus salivarius sp. thermophilus, Lactobacillus delbrueckii sp. bulgaricus, P. freudenreichii subsp. shermanii*).

Полученные реологические характеристики позволяют прогнозировать влияние различных соотношений микроорганизмов консорциума, а также температуры пастеризации нормализованной смеси на качество готовой продукции. Анализ полученных результатов позволяет выделить сгустки с меньшим количеством коагуляционно-тиксотропных связей, что упростит один из наиболее важных процессов в технологии кисломолочных мягких сыров – процесс отделения влаги на этапе прессования сгустка. Реологические свойства молочных сгустков в сочетании с другими важными показателями (количеством пробиотических и молочнокислых микроорганизмов, кислотностью, потерей питательных веществ в отпрессованную сыворотку и т.д.) способствуют обоснованию выбора сгустков, оптимальных для производства мягких кисломолочных сыров.

Литература

1. *Артюхова С.И., Гаврилова Ю.А.* Использование пробиотиков и пребиотиков в биотехнологии производства биопродуктов. Омск: Изд-во Омского гос. техн. ун-та, 2010. 112 с.
2. *Бояринева И.В.* Теоретические и практические аспекты создания инновационных биопродуктов для функционального питания с использованием консорциума молочнокислых и пропионовокислых бактерий: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Улан-Удэ, 2020. 36 с.
3. *Козлова О.В.* Научные и практические аспекты создания новых биотехнологий производства синбиотических молочных продуктов с метабиотиками: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Кемерово, 2020. 37 с.

4. Choi J., Lee S.I., Rackerby B., Frojen R., Goddik L., Ha S., Park S. Assessment of overall microbial community shift during Cheddar cheese production from raw milk to aging. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020, V. 104, pp. 6249–6260.
5. Muñoz I., Verruck S., Canella M., Dias C.O., Amboni R.D., Prudêncio E.S. The use of soft fresh cheese manufactured from freeze concentrated milk as a novelty protective matrix on Bifidobacterium BB-12 survival under in vitro simulated gastrointestinal conditions. *LWT – Food Science and Technology*. 2018, V. 97, pp. 725–729.
6. Østlie H., Kraggerud H., Longva A.B., Abrahamsen R. Characterisation of the microflora during ripening of a Norwegian semi-hard cheese with adjunct culture of propionic acid bacteria. *International Dairy Journal*. 2016, V. 54, pp. 43–49.
7. *Маслова Г.В.*, *Маслов А.М.* Реология рыбы и рыбных продуктов. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. 214 с.
8. *Гудков А.В.* Сыроделие: технологические, биологические и физико-химические аспекты. М.: ДеЛи принт, 2004. 803 с.
9. *Твердохлеб Г.В., Раманаускас Р.И.* Химия и физика молока и молочных продуктов. М.: ДеЛи принт, 2006. 358 с.
10. *Косой В.Д., Дунченко Н.И., Меркулов М.Ю.* Реология молочных продуктов. М.: ДеЛи принт, 2010. 826 с.
11. *Меркулов М.Ю.* Совершенствование и использование методов инженерной реологии для прогнозирования и контроля физико-химических характеристик молочных продуктов в процессе их разработки и производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 22 с.
12. *Холобова К.А., Анистратова О.В.* Микробиологические аспекты производства мягких сыров с использованием пробиотических культур // Технологии и продукты здорового питания: сб. тр. Саратов: Изд-во Саратов. гос. аграрн. ун-та, 2021. С. 725–730.
13. *Крупенникова В.Е., Раднаева В.Д., Танганов Б.Б.* Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDVII+Pro. Улан-Удэ: Изд-во Вост.-Сиб. гос. технол. ун-та, 2011. 48 с.
14. *Лисин П.А., Пасько О.В., Есипова М.С.* Реологическая оценка структуры йогурта обогащенного // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 2. С. 111–120.
15. *Дунченко Н.И.* Структурированные молочные продукты. М. ; Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2002. 164 с.

References

1. Artyukhova S.I. Gavrilov Yu.A. The use of probiotics and prebiotics in biotechnology of the production of bioproducts: monograph. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2010. 112 p. (*In Russian*)
2. Boyarineva I.V. Theoretical and practical aspects of creating innovative biological products for functional nutrition using a consortium of lactic acid and propionic acid bacteria. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Ulan-Ude, 2020. 36 p. (*In Russian*)
3. Kozlova O.V. Scientific and practical aspects of creating new biotechnologies for the production of synbiotic dairy products with metabiotics. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kemerovo, 2020. 37 p. (*In Russian*)
4. Choi J., Lee S.I., Rackerby B., Frojen R., Goddik L., Ha S., Park S. Assessment of overall microbial community shift during Cheddar cheese production from raw milk to aging. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020, V. 104, pp. 6249–6260.
5. Muñoz I., Verruck S., Canella M., Dias C.O., Amboni R.D., Prudêncio E.S. The use of soft fresh cheese manufactured from freeze concentrated milk as a novelty protective matrix on Bifidobacterium BB-12 survival under in vitro simulated gastrointestinal conditions. *LWT – Food Science and Technology*. 2018, V. 97, pp. 725–729.
6. Østlie H., Kraggerud H., Longva A.B., Abrahamsen R. Characterisation of the microflora during ripening of a Norwegian semi-hard cheese with adjunct culture of propionic acid bacteria. *International Dairy Journal*. 2016, V. 54, pp. 43–49.
7. Maslova G.V., Maslov A.M. *Rheology of fish and fish products*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981. 214 p. (*In Russian*)
8. Gudkov A.V. *Cheese making: technological, biological and physicochemical aspects*. Moscow, DeLi print Publ., 2004. 803 p. (*In Russian*)
9. Tverdokhleb G.V., Ramanauskas R.I. *Chemistry and physics of milk and dairy products*. Moscow, DeLi print Publ., 2006. 358 p. (*In Russian*)
10. Oblique V.D., Dunchenko N.I., Merkulov M.Yu. *Rheology of dairy products*. Moscow, DeLi print Publ., 2010. 826 p. (*In Russian*)
11. Merkulov M.Yu. Improvement and use of engineering rheology methods for predicting and controlling the physicochemical characteristics of dairy products in the process of their development and production. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 2003. 22 p. (*In Russian*)
12. Kholobova K.A., Anistratova O.V. Microbiological aspects of the production of soft cheeses using probiotic cultures. *Technologies and products of healthy food*. Collection of articles. Saratov, Saratov State Agricultural

University Publ., 2021. pp. 725–730. (*In Russian*)
13. Krupennikova V.E., Radnaeva V.D., Tanganov B.B. Determination of dynamic viscosity on a rotary viscometer Brookfield RVDVII + Pro. Ulan-Ude, East Siberian state technological university Publ., 2011. 48 p. (*In Russian*)
14. Lisin P.A., Pasko O.V., Esipova M.S. Rheological assessment of the structure of enriched yoghurt. *Vestnik of Omsk SAU*. 2017. № 2. pp. 111–120. (*In Russian*)
15. Dunchenko N.I. Structured dairy products. Moscow: Barnaul, Altai State Technical University named after I.I. Polzunova Publ., 2002. 164 p. (*In Russian*)

Информация об авторах
Ксения Александровна Холобова – аспирант Кафедры технологии продуктов питания
Оксана Вячеславовна Анистратова – канд. техн. наук, доцент Кафедры технологии продуктов питания

Information about the authors
Ksenia A. Kholobova, Postgraduate Student, Department of Food Technology
Oksana V. Anistratova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Food Technology

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 07.05.2021
Одобрена после рецензирования 24.05.2021
Принята к публикации 31.05.2021

The article was submitted 07.05.2021
Approved after reviewing 24.05.2021
Accepted for publication 31.05.2021