УДК 637.1:613.287.58
https://doi.org/10.21603/1019-8946-2023-5-3

Ультразвуковая обработка
в технологии производства йогурта

Александр Алексеевич Борисенко, д-р техн. наук, профессор
Елена Геннадьевна Костенко, аспирант
Константин Васильевич Костенко, канд. техн. наук, доцент
Алексей Алексеевич Борисенко, д-р техн. наук, профессор
Александр Владимирович Малсугенов, канд. техн. наук, доцент
Виктория Алексеевна Мисюра, канд. техн. наук
Северо-Кавказский федеральный университет
E-mail: alaborisenko@ncfu.ru

Изучено влияние ультразвуковой обработки на реологические и в целом качественные характеристики готовой продукции при производстве йогуртов. В качестве сырья использовалось нормализованное пастеризованное молоко с содержанием жира 2,5 %, белка и сухого обезжиренного молочного остатка — не менее 3,2 и 9,5 % соответственно, сухая йогуртовая закваска Lactoferm ECO (Streptococcus salivarius subsp. thermophilus., Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgarius). Представлены результаты анализа дисперсного состава молочной смеси через 2,5 ч сквашивания, а также зависимости напряжения сдвига и коэффициента эффективной вязкости от градиента скорости деформации. Ультразвуковая обработка способствует повышению дисперсности молочной смеси, формированию однородной сетчатой белковой матрицы с высоким уровнем взаимосвязей и меньшим размером пор. Комплексное исследование реологических показателей, микроскопирование и органолептический анализ позволили сделать вывод о том, что образцы кисломолочного продукта, выработанные с использованием ультразвуковой обработки, имеют более высокие потребительские свойства в сравнении с йогуртом, полученным по традиционной технологии.

Ключевые слова: *йогурт, ультразвуковая обработка, фотонно-корреляционная спектроскопия, акустическая спектроскопия, дисперсная фаза, микроскопия, напряжение сдвига, эффективная вязкость.*

Borisenko A. A., Kostenko E. G., Kostenko K. V., Borisenko A. A., Malsugenov A. V., Misyura V. A. Ultrasonic processing in yogurt production technology

North-Caucasus Federal University

The aim of the study was to study the effect of ultrasonic treatment on the rheological and total qualitative characteristics of finished products in the production of yoghurts. The raw materials used were normalized pasteurized milk with a fat content of 2,5 %, protein and skimmed milk residue — at least 3,2 and 9,5 %, respectively, Lactoferm ECO dry yogurt starter culture (Streptococcus salivarius subsp. thermophilus, Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgarius). The results of the analysis of the dispersed composition of the milk mixture after 2,5 hours of fermentation, as well as the dependence of the shear stress and the effective viscosity coefficient on the deformation rate gradient are presented. Ultrasonic treatment helps to increase the dispersion of the milk mixture, the formation of a homogeneous mesh protein matrix with a high level of interconnections and a smaller pore size. A comprehensive study of rheological parameters, microscopy and organoleptic analysis allowed us to conclude that samples of fermented milk product produced using ultrasonic processing have higher consumer properties compared to yogurt obtained using traditional technology.

Key words: *yogurt, ultrasonic processing, photon-correlation spectroscopy, acoustic spectroscopy, dispersed phase, microscopy, shear stress, effective viscosity.*

Одним из актуальных направлений научных исследований и разработок в пищевой промышленности является поиск способов повышения эффективности технологических процессов с целью улучшения качества готовой продукции. В настоящее время особый интерес вызывает ультразвуковая обработка как инновационный способ, позволяющий регулировать или изменять свойства пищевых систем [1–6]. Перспективы использования ультразвука связаны с его многочисленными физико-химическими эффектами, обусловливающими возможность интенсифицировать процессы перемешивания, гомогенизации, экстракции, фильтрации, кристаллизации, ферментации, дегазации, гелеобразования, инактивирования микроорганизмов и ферментов [5]. Важным направлением является применение ультразвукового воздействия для улучшения реологических (структурно-механических) характеристик кисломолочных продуктов.

Цель исследования — изучение влияния ультразвуковой обработки на реологические и в целом качественные характеристики при производстве йогуртов.

Материалы и методы. В работе использовалось нормализованное пастеризованное молоко с содержанием жира 2,5 %, белка и сухого обезжиренного молочного остатка — не менее 3,2 и 9,5 % соответственно (производитель Молочный комбинат «Ставропольский»). Применялась сухая йогуртовая закваска Lactoferm ECO (Италия), состоящая из штаммов *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* и *Lactobacillus delbrueckii* subsp. bulgarius. Количество микроорганизмов не менее $1 \cdot 10^9$ КОЕ/г.

Молоко нагревали до 35–38 °С, вносили сухую закваску в количестве 0,5 г/л, тщательно перемешивали в течение 3–5 минут и разливали в индивидуальную стерильную тару по 120 мл. Контрольные образцы сразу помещали в шкаф для термостатирования при 38–42 °С, а опытные перед термостатированием подвергали ультразвуковой обработке. Через 2,5 ч ультразвуковое воздействие повторяли. Для ультразвуковой обработки использовался процессор UP400S (Hielscher, Германия) при предварительно установленных оптимальных режимах: частоте 24 кГц, интенсивности 264–266 Вт/см^2, удельной мощности 840–860 Вт/дм^3, продолжительность первичной обработки 60 с, повторной — 10 с. Образцы сквашивали до значений pH 4,5–4,7 ед. Активную кислотность определяли в динамике по ГОСТ 32892–2014 с использованием pH-метра-иономера «Эксперт-001». Затем образцы охлаждали до 3–5 °С.

Измерение вязкости йогуртов. Показатель вязкости определяли на ротационном вискозиметре «Rheotest II» с цилиндром S1 путем измерения напряжения сдвига и коэффициента эффективной вязкости в диапазоне изменения градиента скорости деформации от 1,5 до 1300 с$^{-1}$.

Микроскопия йогуртов. Структуру сгустков йогурта исследовали с использованием микроскопа исследовательского класса «Axio ZOOM. V16» (Carl Zeiss Microscopy, Германия). Изображения фиксировали с помощью специализированной фотокамеры «AxioCam MRc5» с использованием программного обеспечения Zen 2. Образцы йогурта распределяли на предметном стекле, стараясь минимизировать механические воздействия на сгусток.

Размеры частиц дисперсной фазы. Дисперсный состав молока с внесенной сухой йогуртовой закваской (молочная смесь) определяли через 2,5 ч после начала сквашивания методом фотонно-корреляционной спектроскопии на многофункциональном спектрометре динамического и статического рассеяния света «Photocor Complex» (ООО «Антек-97», Россия). Измерения проводили в соответствии с ГОСТ Р 8.774. Анализ размеров частиц с учетом их распределения по фракциям (белковая и жировая) осуществляли методом акустической спектроскопии на установке DT-1202 (Dispersion Technology Inc., США). Компьютерную обработку данных спектроскопии проводили с применением программного обеспечения DynaLS.

Результаты исследований и их обсуждение. Однородная консистенция, вязкость и вкус являются ключевыми потребительскими свойствами йогурта, которые формируются в процессе образования белковой матрицы, состоящей из казеиновых нитей и их кластеров, а также захваченной ими сыворотки и жировых шариков [6, 7]. При этом существенное влияние на свойства и структуру сгустка оказывает дисперсность молочного сырья [7]. Дисперсный состав частиц контрольного и опытного образцов молочной смеси представлен на рисунке 1.

Метод фотонно-корреляционной спектроскопии позволяет оценить количественное распределение частиц дисперсной фазы исследуемой молочной смеси по размерам и определить их средний гидродинамический радиус, не дифференцируя при этом частицы по различным фракциям [8]. Для контрольного образца смеси средний гидродинамический радиус составил 82,3±1,6 нм.

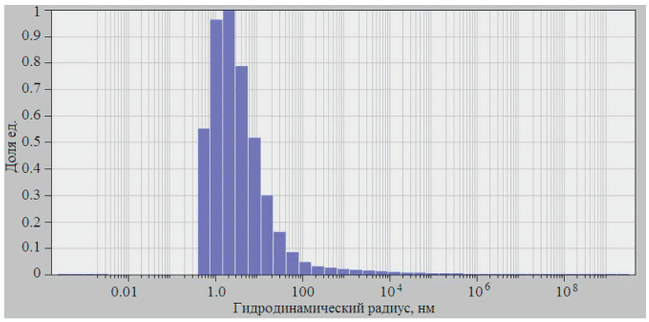
Сравнение гистограмм показало, что в опытном образце молочной смеси средний гидродинамический радиус частиц в 1,4 раза меньше (58,6±1,4 нм), чем в контрольном. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что ультразвуковая обработка при установленных режимах способствует формированию более мелкодисперсной структуры молочной смеси.

Анализ распределения частиц дисперсной фазы молочной смеси по фракциям (белковая и жировая) с использованием метода акустической спектроскопии выявил, что в опытном образце по отношению к контрольному средний диаметр белковых (казеиновых) частиц меньше в 1,4 раза, а жировых шариков — в 1,9 раза. Средний диаметр белковых частиц в контрольном образце составил 154 нм, в опытном — 110 нм ($m_{ср}$±4,0); жировых шариков — соответственно 1100 и 579 нм ($m_{ср}$±5,0).

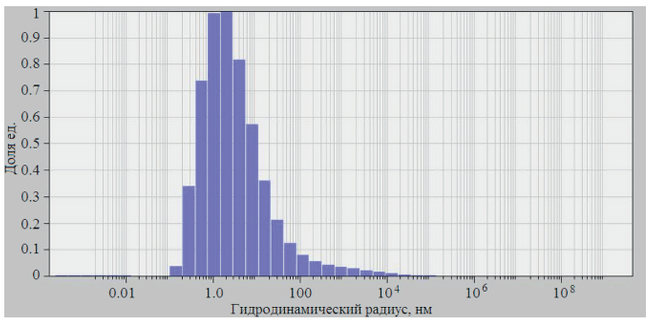
Исследования, проведенные двумя разными методами, показали, что значения среднего гидродинамического радиуса частиц молочной смеси и казеиновых мицелл численно сопоставимы. На наш взгляд, это вполне может отражать достоверность результатов и подтверждать достаточно высокую точность опытов, поскольку связано со значительным количественным перевесом мицелл казеина по отношению к жировым шарикам в молоке. Кроме того, полученные размеры жировых шариков хорошо согласуются с данными других авторов [9].

На рисунке 2 представлены микрофотографии готовых йогуртов, приготовленных традиционным способом (контроль) и с использованием ультразвуковой обработки (опытный образец).

Результаты микроскопии позволяют сделать вывод о том, что по сравнению с контролем (рис. 2, *а* и *б*) в йогурте, приготовленном с использованием ультразвуковой обработки (рис. 2, *в* и *г*), сформировалась более однородная сетчатая белковая матрица с высоким уровнем взаимосвязей и меньшим размером пор, равномерно расположенных по всей структуре. В контрольном образце присутствуют отдельные крупные (от 40 до 320 мкм) белковые конгломераты, отсутствующие в структуре опытного образца. Учитывая размер частиц дисперсной фазы молочной смеси, используемой для приготовления йогурта (см. рис. 1), можно заключить, что ультразвуковая обработка при установленных режимах привела к разделению части мицелл казеина на субъединицы, которые во время ферментации способствовали образованию высокоструктурированной белковой сети за счет хорошего взаимодействия друг с другом и с сывороточными белками.



а



б

Рис. 1. Распределение гидродинамического радиуса частиц дисперсной фазы контрольного (а) и опытного (б) образца молочной смеси

Йогурт относится к неньютоновским жидкостям, поведение которых можно описать уравнением Гершеля-Балкли:

$$\theta = \theta_0 + B_1^* + \gamma^n, \quad (1)$$

где θ — напряжение сдвига между слоями продукта, Па; θ_0 — предельное напряжение сдвига, т. е. напряжение, по достижении которого в системе начинают развиваться необратимые деформации (течение), Па; B_1^*— коэффициент консистенции, пропорциональный вязкости, Па•с; γ^n — градиент скорости деформации или скорость сдвига (скорость деформации), $с^{-1}$; n — индекс течения.

Для определения влияния ультразвуковой обработки на реологические (структурно-механические) характеристики йогурта в образцах определяли напряжение сдвига. Процесс исследования проводился в условиях изменения основных параметров и включал следующие этапы:

1. Возрастание значения градиента скорости деформации, во время которого частота вращения рабочего цилиндра вискозиметра постепенно увеличивалась от минимального до максимального значения.

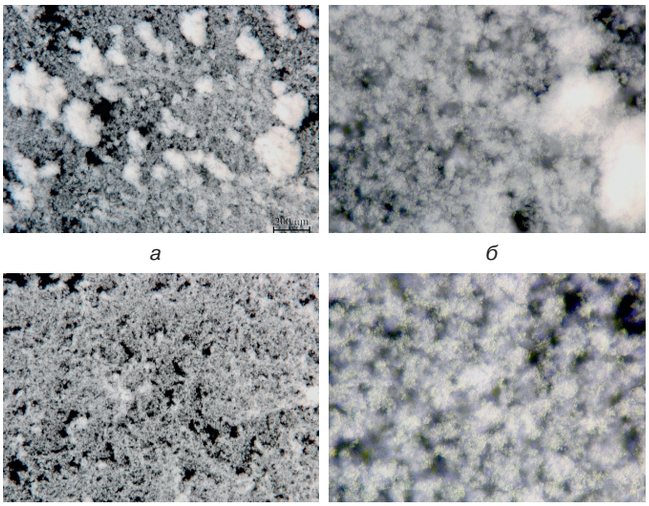


Рис. 2. Образцы йогурта: а и б – контрольный при увеличении соответственно ×50 и ×200; в и г – опытный при увеличении ×50 и ×200

2. Выдерживание образца при постоянной наибольшей частоте вращения цилиндра до тех пор, пока показания на приборе перестали изменяться. Происходит максимально возможное разрушение структуры продукта.

3. Снижение градиента скорости деформации, во время которого постепенно уменьшалась частота вращения рабочего цилиндра вискозиметра от максимальной до минимальной (или той частоты вращения, при которой показания измерительного прибора были отличны от нуля).

Результаты определения реологических свойств йогурта представлены в виде графиков зависимости напряжения сдвига от градиента скорости деформации на рисунке 3.

При увеличении градиента скорости деформации наблюдается возрастание величины напряжения сдвига, что соответствует поведению йогурта как псевдопластичного реологического тела, не имеющего предельного статического напряжения сдвига и описываемого уравнением Оствальда [10]. Причем значения напряжения сдвига для опытного продукта на всем диапазоне изменения градиента скорости деформации в обоих направлениях стабильно выше, чем у контрольного образца.

Графики зависимостей коэффициента эффективной вязкости от градиента скорости деформации образцов йогурта, представленные на рис. 4, описываются законом Ньютона, который устанавливает связь между скоростью деформации и напряжением сдвига [10]:

$$P = \eta \cdot (d\gamma / dt) = \eta\gamma, \qquad (2)$$

где P — напряжение сдвига, поддерживающее течение жидкости, Па; γ — скорость деформации, с⁻¹; η — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом вязкости или эффективной вязкостью, Па·с.

Полученные зависимости коэффициента эффективной вязкости от градиента скорости деформации (рис. 4, таблица) свидетельствуют о том, что йогурт, полученный с использованием ультразвуковой обработки, характеризуется более высокими значениями эффективной вязкости, чем контрольный образец. Наибольшая разница отношений напряжения сдвига и коэффициента эффективной вязкости между этими образцами наблюдается при минимальных и небольших значениях градиента скорости деформации, которая затем постепенно снижается в области относительно высоких значений.

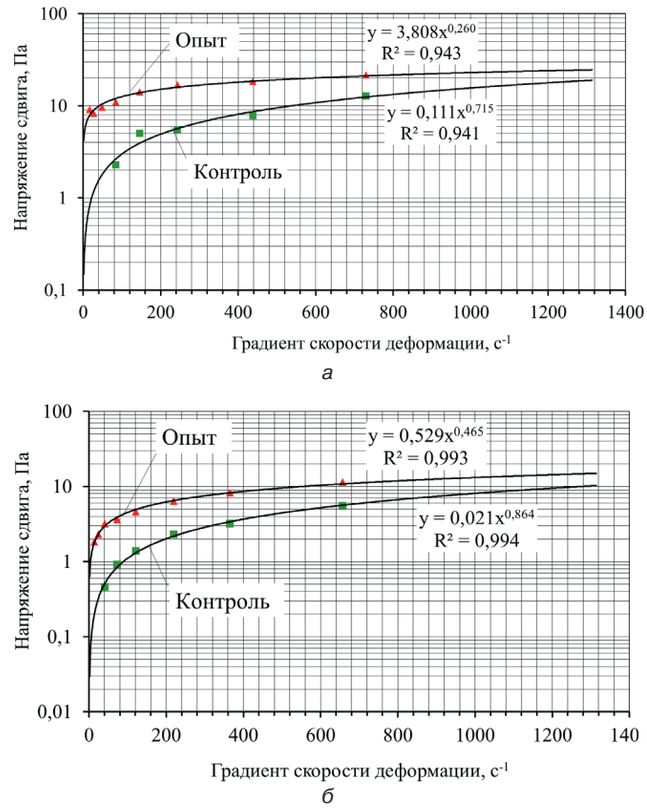


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига от градиента скорости деформации образцов йогурта при 20 °С: а – при возрастании градиента скорости деформации; б – при убывании градиента скорости деформации

Зависимость отношений напряжения сдвига и эффективной вязкости опытного образца к контрольному от градиента скорости деформации

Градиент скорости деформации, с⁻¹	Отношение напряжения сдвига (при возрастании градиента скорости деформации)	Отношение коэффициента эффективной вязкости (при убывании градиента скорости деформации)
1,5	28,5	21,7
13,5	10,5	9,1
120,0	3,9	3,7
730,0	1,7	1,8
1300,0	1,3	1,5

Таким образом, йогурт, выработанный с использованием ультразвуковой обработки молочной смеси, обладает улучшенными реологическими характеристиками. Структурно-механические свойства всех исследуемых образцов йогурта по мере разрушения их структуры приближаются к такой модели реологического тела, как истинно вязкая ньютоновская жидкость, что соответствует результатам исследований других авторов [10, 11].

Органолептическая оценка образцов, выработанных с использованием ультразвуковой обработки и без нее, подтвердила высокое качество кисломолочного продукта. Общая дегустационная оценка контрольного образцов йогур-

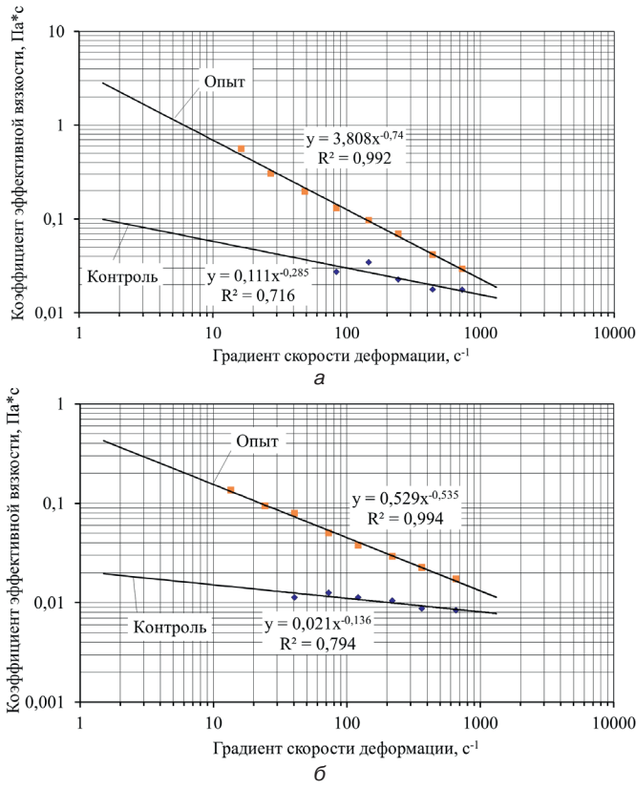


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективной вязкости от градиента скорости деформации образцов при 20 °С: а – при возрастании градиента скорости деформации; б – при убывании градиента скорости деформации

та составила 4,4 балла против 4,9 баллов опытного образца, преимущества которого также были по внешнему виду (соответственно 4,2 и 5,0 баллов), вкусу и запаху (4,6 против 4,8), цвету (4,6 и 4,8), а также по консистенции (4,2 против 5,0 баллов опытного образца). Все образцы представляют собой в меру вязкую жидкость с ненарушенным сгустком и чистым кисломолочным запахом, соответствующим готовому йогурту. Продукт, полученный с использованием ультразвукового воздействия, отличался более высокой вязкостью, однородной консистенцией, выраженным кисломолочным вкусом и запахом.

ВЫВОДЫ

- Использование в технологии производства йогурта ультразвуковой обработки с заданными режимами позволяет в молочной смеси снизить размер жировых шариков и белковых частиц в 1,9 и 1,4 раза соответственно, повышает ее дисперсность, способствует стабилизации белковой матрицы и улучшению реологических свойств.
- Ультразвуковое воздействие обеспечивает формирование однородной сетчатой белковой структуры в сгустке йогурта с высоким уровнем взаимосвязей, меньшим размером пор и высокой дисперсностью пищевой системы.
- Комплексное исследование реологических показателей, микроскопирование и органолептический анализ позволяют сделать вывод о том, что образцы кисломолочного продукта, выработанные с использованием ультразвуковой обработки, имеют более высокие потребительские свойства в сравнении с йогуртом, полученным по традиционной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Создание первого в России высокотехнологичного производства пребиотика лактулозы и функциональных молочных ингредиентов для импортозамещения в медицине, ветеринарии, детском питании, производстве лечебно-профилактических продуктов для людей и животных» (Соглашение № 075-11-2022-021 от 07.04.2022 г.) в рамках Постановления Правительства РФ от 9.04.2010 г. № 218 на базе ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ***Rana, A.*** *Ultrasonic processing and its use in food industry: A review/A. Rana, K. Meena [et al.]// International Journal of chemical studies. 2017. Vol. 5 (6). P. 1961–1968.*
2. ***Khadhraoui, B.*** *Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products/B. Khadhraoui, V. Ummat, B. K. Tiwari [et al.]// Ultrasonics Sonochemistry, Elsevier. 2021. Vol. 76.105625.*
3. ***Chemat, F.*** *Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction/F. Chemat, N. Rombaut, A. Meullemiestre [et al.]// Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2017. Vol. 41. P. 357–377.*
4. ***Huang, G.*** *Effects of ultrasound on microbial growth and enzyme activity/G. Huang, S. Chen, C. Dai [et al.]// Ultrason. Sonochem. 2017. Vol. 37. P. 144–149.*
5. ***Muthupandian, A.*** *The ultrasonic processing of dairy products — An overview/A. Muthupandian, R. Bhaskaracharya, S. Kentish [et al.]// Dairy Science & Technology, EDP sciences/Springer. 2010. Vol. 90. P. 147–168.*
6. ***Oguz, G.*** *Effect of ultrasound power on physicochemical and rheological properties of yoghurt drink produced with thermosonicated milk/G. Oguz, Y. Yusuf, G. Ozge, E. Kubra// Emirates Journal of Food and Agriculture. 2016. Vol. 28 (4). P. 235–241.*
7. ***Тамим, А. Й.*** *Йогурт и аналогичные кисломолочные продукты: научные основы и технологии/А. Й. Тамим, Р. К. Робинсон; пер. с англ. под ред. Л. А. Забодаловой. — СПб: Профессия, 2003. — 664 с.*
8. ***Блинов, А. В.*** *Особенности исследования дисперсного состава молока методом фотонно-корреляционной спектроскопии// А. В. Блинов, В. А. Кравцов, А. В. Серов [и др.]// Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы химии, биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона: материалы IV ежегодной научно-практической конференции. — Ставрополь, СКФУ. — 2016. — С. 22–24.*
9. ***Riener, J.*** *The effect of thermosonication of milk on selected physicochemical and microstructural properties of yoghurt gels during fermentation/J. Riener, F. Noci, D. A. Cronin [et al.]// Food Chem. 2009. Vol. 114. P. 905–911.*
10. ***Гордиенко, Л. А.*** *Йогурт с использованием концентрата сывороточных белков: реологические свойства/Л. А. Гордиенко, И. К. Куликова, И. А. Евдокимов// Молочная промышленость. 2019. № 8. С. 72–73.*
11. ***Лисин, П. А.*** *Реологическая оценка структуры йогурта обогащенного/П. А. Лисин, О. В. Пасько, М. С. Есипова// Вестник Омского ГАУ. 2017. № 2 (26). С. 111–120.*