

УДК 664

**Костенко Константин Васильевич, Салманова Динара Александровна,
Брацихин Андрей Александрович, Борисенко Алексей Алексеевич**

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

В статье приведен обзор применения акустической кавитации в молочной промышленности. Актуальность проблемы обусловлена постоянно растущим спросом на молочную продукцию, полученную с помощью безреагентного регулирования свойств сырья и готовой продукции. При этом сырье сохраняет свою высокую пищевую ценность. В настоящее время акустическая кавитация применяется в молочной промышленности для выполнения большого количества технологических процессов, в их число входят: пастеризация, гомогенизация, инаktivация патогенных микроорганизмов, эмульгирование, ускорение процессов ферментации, очистка мембран при ультрафильтрации, сонокристаллизация, получение безлактозного молока.

Ключевые слова: акустическая кавитация, молоко, молочная сыворотка, безреагентная обработка молочного сырья, инаktivация патогенной микрофлоры, формирование стабильных гомогенных систем.

Konstantin Kostenko, Dinara Salmanova, Andrey Bratsihin, Aleksey Borisenko
**PROSPECTS OF APPLICATION OF ACOUSTIC TREATMENT
FOR THE PRODUCTION OF DAIRY PRODUCTS**

This article provides an overview of the use of ultrasonic cavitation in the dairy industry. The urgency of the problems caused by the growing demand for milk products obtained using reagent-free control of raw material properties and the finished product. At the same time raw material retains its high nutritional value. Currently, acoustic cavitation is used in the dairy industry to perform a large number of processes, these include: pasteurization, homogenization, inactivation of pathogenic microorganisms, emulsification, accelerate the fermentation process, the membrane in the ultrafiltration treatment, sonokristallization, obtaining lactose-free milk.

Key words: acoustic cavitation, milk, whey, reagentless processing of raw milk, Inactivation of pathogenic organisms, Forming a stable homogeneous systems.

В настоящее время, среди потребителей растет спрос на продукцию, обработанную с использованием щадящих технологий, обеспечивающих возможность безреагентного регулирования технологических и других качественных свойств сырья и готовой продукции при обеспечении их высокой пищевой ценности. Так, например, традиционные методы пастеризации и стерилизации не только инаktivируют или уменьшают количество микроорганизмов, но также уменьшают пищевую ценность и ухудшают органолептические качества пищевых продуктов [10].

Возможности нетермической пастеризации открывает обработка продуктов ультразвуком. помощью механических колебаний достаточно высокой интенсивности, вызванных акустической кавитацией, ультразвук может производить изменения в среде либо нарушать её структуру [10].

Воздействие ультразвука является одной из наиболее перспективных технологий для обработки молочных продуктов, наряду с такими способами обработки, как: обработка ультравысоким давлением или импульсными электрическими полями, сверхкритическая флюидная экстракция, микрофлюидизация и воздействие ультрафиолета [9, 20, 34]. При этом отмечается, что ультразвуковая обработка является технологией с возможностью хорошей окупаемости инвестиций капиталовложений на ее внедрение в технологические процессы [1, 7, 27].

Свежее молоко является скоропортящимся продуктом питания, который требует быстрой промышленной обработки. Классическими процессами молочной промышленности, используемыми для обработки молока, являются гомогенизация и пастеризация. Как известно, термическая обработка,

которая используется, чтобы уменьшить микробное число, имеет несколько недостатков: денатурации белка, снижение питательной ценности и т. д. [11]. Учеными разных стран мира было установлено, что механические и химические эффекты, создаваемые низкочастотным ультразвуком высокой интенсивности, могут использоваться для инактивации патогенных микроорганизмов в пищевых продуктах и улучшения процесса эмульгирования [1, 20, 33].

Ультразвуковое воздействие вызывает звуковые волны, механические колебания которых распространяются с частотой, большей, чем верхний предел человеческого слуха. Когда эти волны распространяются в жидких средах, происходят многократные циклы сжатия и расширения среды. Во время цикла расширения высокая интенсивность ультразвуковых волн способствует росту маленьких пузырьков в жидкости. Когда они достигают объемов, при которых поглощение энергии уже невозможно, происходит схлопывание пузырьков. Это явление известно как кавитация. Во время схлопывания внутри этих пузырьков достигаются очень высокие температуры (около 5000 К) и давление (около 50 000 кПа) [10].

Акустическая кавитация при низких частотах (20 кГц) генерирует значительные физические усилия в системе (сдвиг, турбулентность и т. д.). Количество образующихся активных радикалов при этом очень мало [3]. Большая частота акустической кавитации (300–500 кГц) генерирует относительно слабые физические эффекты и значительно большее количество химически активных радикалов [1]. В пищевом и молочном производстве в основном применяется низкочастотный ультразвук с коротким временем воздействия на пищевую среду [1, 30].

В настоящее время ультразвук может быть использован и как отдельный вид обработки, и в сочетании с другими процессами, повышающими его эффективность [10]:

- 1) термоакустическая обработка, или «термоозвучивание», представляет собой комбинированный метод с применением ультразвука и тепла. Продукт подвергается озвучиванию одновременно с умеренным нагревом. Этот метод оказывает большее влияние на инактивацию микроорганизмов, чем воздействие тепла без ультразвука;
- 2) метод, называемый в отдельных источниках «маноозвучивание» – комбинированный метод, в котором ультразвук и давление применяются вместе. «Маноозвучивание» обеспечивает инактивацию ферментов и / или микроорганизмов, сочетая ультразвук с давлением средней величины (от 100 до 300 кПа) при низких температурах;
- 3) комбинированный метод воздействия на продукт теплом, ультразвуком и давлением.

Применение ультразвука в молочной промышленности представлено на рисунке.



Рис. Применение ультразвука в молочной промышленности

Рядом исследователей было обнаружено, что комбинированный метод инактивирует внеклеточные липазы и протеазы более эффективно, чем просто тепловая обработка [16, 28, 32]. Профессором Бермедес-Агирре доказано, что инактивация мезофильных бактерий в сыром цельном молоке более эффективна, когда «термоозвучивание» используется вместо тепловой пастеризации [4, 5].

М. А. Гарсиа, Дж. Бургос и Б. Санс использовали комбинацию тепла и ультразвука, чтобы исследовать выживаемость в молоке двух штаммов сенной палочки [13]. Было отмечено, что одновременное использование тепла (70–95 °С) и ультразвука (20 кГц, 150 Вт) было более эффективным в процессе дезактивации по сравнению с обработкой теплом или ультразвуком по отдельности. Жизнеспособность спор уменьшилась на 70 % и 99,9 % после процесса «термоозвучивания». Тем не менее данный метод до сих пор не имеет коммерческого применения, так как обработка молока ультразвуком высокой интенсивности может влиять на появление нежелательных привкусов [30]. Использование более мягких режимов обработки ультразвуком может оказаться эффективным в процессах брожения молока. Использование ультразвука низкой интенсивности увеличивает перенос массы в пределах бродильного резервуара, и таким образом увеличивается производительность фермента. Доказано, что обработка ультразвуком ускоряет гидролиз лактозы в молоке в присутствии закваски (*Lactobacillus Delbrueckii*) и, следовательно, процесс ферментации [31]. Использование ультразвука частотой 20 кГц уменьшает время брожения в процессах получения йогурта [1, 21]. Мутупандиан Ашоккумар и его коллеги доказали, что время ферментации молока с помощью ультразвука было значительно снижено за счет увеличения ультразвуком активности фермента. Кроме того, также наблюдалось уменьшение синерезиса и улучшение вязкости йогурта. Эти эффекты были обоснованы увеличением водоудерживающей способности за счет того, что увеличивается поверхность жирового шарика [1, 36].

Учеными из университета штата Вашингтон была изучена структура жировых шариков в цельном молоке после тепловой и ультразвуковой обработки, для того чтобы наблюдать, что происходит во время этих процессов на микроскопическом уровне [6]. Объектом исследования являлось цельное молоко. Обработку проводили на ультразвуковом аппарате Hielscher UP-400S (400 Вт, 24 кГц, амплитуда 120 мкм). Обработка проходила при 63 °С в течение 30 мин. Цвет и содержание жировых шариков измеряли, сопоставляя изображения с аналитическими измерениями. Результаты показали, что поверхность жирового шарика имела некоторую шероховатость после обработки ультразвуком. Ультразвуковые волны разлагают мембраны жирового шарика молока, освобождая триацилглицерины. Кроме того, общий состав молока после ультразвуковой обработки включает в себя меньшие по размеру жировые шарики (менее 1 мкм), имеющие гранулированную поверхность. Это связано с взаимодействием между нарушенной мембраной жирового шарика и некоторыми мицелл казеина. В жировых шариках молока, обработанного теплом, были обнаружены незначительные изменения. Обработанное ультразвуком молоко было белее и имело большую степень гомогенизации по сравнению с молоком, обработанным тепловым способом, а также с сырым молоком. Исследованиями установлено, что после обработки молока ультразвуком отмечается более высокое значение содержания жира (4,24 %) по сравнению с необработанным сырым молоком (4,04 %). При этом после обработки ультразвуком молочный жир становится более доступным.

Одним из перспективных направлений в пищевой промышленности является создание мелкодисперсных эмульсий. Данная технология позволяет добавлять новые жирорастворимые компоненты к водной основе с минимальным влиянием на прозрачность и стабильность растворов. Для подготовки таких пищевых эмульсий учеными из Университета Горгана (Иран) был эффективно использован низкочастотный ультразвук. Проведен сравнительный анализ эффективности эмульгирования ультразвуком и методом микрофлюидизации [15]. Наноэмульсию Д-лимонена получали с использованием ультразвука с частотой 24 кГц, а диапазон размеров капель эмульсии сравнивали с полученными значениями в пневматическом микрораспылителе, работающим при 20–124 МПа. Оба метода обеспечивали размер капель эмульсии в диапазоне 150–700 нм, однако способ с применением ультразвука был лучше с точки зрения управления процессом и осветления эмульсий [1].

Помимо обработки пищевых сред ультразвуковое оборудование применяется для очистки мембран при ультрафильтрации. Загрязнение мембран является основным вопросом, влияющим на стоимость и эффективность многих молочных производственных операций. Во время фильтрации молока и его составных частей, происходит налипание частиц на фильтрационные мембраны, ведущее к мембранному загрязнению и, в конечном счете, снижению пропускной способности мембран [1, 23–26]. Ультразвук значительно улучшает эффективность очистки мембраны. Во-первых, усиливается конвективный коэффициент теплопередачи, что приводит к более низкой температуре нагрева поверхности. Более низкая температура поверхности приводит к снижению загрязнения. Во-вторых, даже когда температура поверхности увеличена, налипания не происходит из-за чистящих и акустических эффектов на поверхности. Ультразвук успешно используется для очистки пресс-форм сыра [1]. Однако стоит отметить, что капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с применением ультразвука для цикла очистки мембраны, сами по себе вряд ли будут выгодны в экономическом плане.

Учеными из университета города Загреб (Хорватия) было проведено исследование для выявления влияния ультразвука высокой интенсивности на функциональность некоторых наиболее часто используемых пищевых белков в промышленном масштабе. Изученные функциональные свойства изменялись по-разному в зависимости от размера и природы белка. Изучалось влияние ультразвука низкой интенсивности (500 Гц) и ультразвука высокой интенсивности (частота 20 кГц и 40 кГц), на растворимость, эмульгирование и пенообразующие свойства сывороточного белкового изолята, сывороточного белкового концентрата и гидролизата белка молочной сыворотки. Растворимость значительно увеличилась во всех образцах, обрабатываемых с частотой 20 кГц, 40 кГц и 500 Гц для сывороточного белкового концентрата. Белковые системы были получены с использованием комбинации двухступенчатого эмульгирования и теплового индуцированного гелеобразования. Термообработка существенно не изменяет дзета-потенциал частиц, в то время как размер частиц увеличился после нагрева из-за набухания. Результаты показывают, что набухание частиц играет важную роль в стабильности тепла и реологических свойств этих дисперсий. Индуцированные ультразвуком структурные изменения в белках связаны с частичным разрывом межмолекулярных гидрофобных взаимодействий, а не пептидных или дисульфидных связей. После обработки при 20 кГц наблюдалось значительное снижение молекулярной массы и фракционирования белков. После обработке при 40 кГц также наблюдались значительные изменения в составе молекулярной массы белковых фракций [29]. Изучена способность ультразвуковой обработки уменьшать мутность сывороточных суспензий, которое показало снижение мутности примерно до 90 % при применении ультразвука. Улучшение прозрачности раствора связано с уменьшением размера частиц нерастворимого компонента, вызванного физическими эффектами ультразвука. Обработка ультразвуком при более высоких частотах (> 200 кГц) не дает такого эффекта. Наибольшее снижение мутности наблюдалось, когда ультразвук применяли в течение 15 мин с использованием мощности 15 Вт при 60 °C [29].

Наряду с положительным эффектом применения ультразвука во всех вышеперечисленных процессах акустическая кавитация успешно применяется в явлении, называемом сонокристаллизацией [1, 37]. Контролируя условия обработки ультразвуком, можно получить кристаллы более однородные по размеру [19]. Быстрые местные скорости охлаждения, полученные в ходе акустической кавитации, снижают температуру кристаллизации [12]. Использование низкочастотного ультразвука высокой интенсивности может повысить степень кристаллизации льда, уменьшить время индукции кристаллов и вызвать более равномерный рост кристаллов [1, 22].

В настоящее время ультразвук успешно применяется для сонокристаллизации лактозы. Лактоза является наиболее распространенным углеводом, содержащимся в молоке (4,4–5,2%) и основным компонентом многих концентрированных и сухих молочных и сывороточных продуктов. Для многих продуктов лактоза должна быть сначала кристаллизована. Также она может быть высушена распылением, чтобы в конечном счете получить до 80 % кристаллизованной лактозы [1, 14, 35]. При помощи

ультразвука можно получить около 92 % кристаллизованной лактозы [8]. Кристаллизация лактозы состоит из трех этапов. Первый этап – «перенасыщение» с последующим зарождением (появлением кристаллов) и их ростом. Ультразвуковая кавитация может повысить скорость реакции и интенсифицировать массообмен в жидкости. Сонокристаллизация, как правило, имеет четыре характеристики, которые не являются типичными для кристаллизации без ультразвука: 1) скорость, которая быстрее первичной нуклеации; 2) обеспечение оптимальных условий кристаллизации; 3) инициирование вторичной кристаллизации и 4) производство меньших и более чистых кристаллов [1, 17]. Ультразвуковую обработку применяют на участках посева кристаллов для контроля над ростом, формой и размером кристаллов лактозы. Предполагается, что спонтанная сонокристаллизация лактозы приводит к образованию кристаллов в форме стерженьков. Аналогичное исследование проводилось учеными университетов штата Юта (США) и штата Минас-Жерайс (Бразилия) на жировых шариках в молочных системах. Была доказана уникальная возможность сбалансировать кристаллизованный и некристаллизованный молочный жир для изменения физико-химических характеристик продукта. Было изучено влияние ультразвука высокой интенсивности на жировую кристаллизацию и обнаружено, что кристаллизация может быть достигнута быстрее с формированием более мелких кристаллов. Установлено увеличение вязкости после обработки ультразвуком в результате кристаллизации [1, 18].

Кроме того, с помощью ультразвука можно получить безлактозное молоко. Молоко без лактозы может быть получено путем ферментации лактозы гидролизом молока или одновременным добавлением β -галактозидазы и молочнокислых бактерий. Ультразвук может повышать реакционную активность клеток или стимулировать новое действие в клетках, например в синтезе лактозы гидролизованного ферментированного молока. При применении ультразвука при гидролизе лактозы составляет около 55 %, а с использованием традиционных методов, используемых для того чтобы произвести молоко без лактозы (ферментации), можно достичь гидролиза лактозы только на уровне 36 % [10].

Помимо использования акустической кавитации для обработки молока, использование ультразвука эффективно при приготовлении мороженого. Однако мороженое содержит до 50 % воздуха, в то время как обработка ультразвуком может привести к дегазации смеси. Чтобы избежать изменения структуры мороженого рекомендуется либо увеличение первоначального содержания газа, либо проведение обработки при повышенном давлении [1].

Учеными Университета Турина (Италия) был проведен сравнительный анализ влияния гидродинамической и акустической кавитации на процессы инактивации бактерий в системах. Экспериментальные результаты показывают, что в присутствии двуокиси углерода при гидродинамической кавитации может быть инактивировано до 88 % от общего содержания бактерий. Наилучшие результаты были достигнуты путем обработки свежего молока ультразвуком в течение 10 минут с мощностью ультразвуковых установок 320 Вт и 370 Вт, уровень инактивации при которых достигал 90 % и 95 % соответственно [11]. Одновременно с инактивацией бактерий гидродинамическая и акустическая кавитации могут также обеспечить высокую степень гомогенизации продукта за счет уменьшения размера частиц жира и их равномерного диспергирования [39].

Ультразвуковая обработка – быстро развивающаяся область исследований, которая находит все более широкое применение в пищевой промышленности для анализа, обработки, изменения и сохранения пищевых продуктов. Имеющиеся к настоящему времени сведения о процессах, протекающих при акустической кавитации и их влияние на обрабатываемые среды представляют интерес с точки зрения их использования в технологии обработки молочных продуктов: молока, сыворотки и т.д.; для интенсификации процессов сонокристаллизации лактозы, производства мороженого, создания мелкодисперсных эмульсий, а также для очистки мембран [40,41]. Особый интерес в технологии пищевых продуктов представляет способность ультразвука к инактивации патогенных микроорганизмов и ферментов, и формирования стабильных гомогенных систем.

Литература

1. Ashokkumar M. The ultrasonic processing of dairy products – an overview / M. Ashokkumar, R. Bhaskaracharya, S. Kentish, J. Lee, M. Palmer // Dairy science & technology. 2010. 90 p.
2. Ashokkumar M. Processing of dairy ingredients by ultra-sonication / M. Ashokkumar, S. E. Kentish, J. Lee, B. Zisu, M. Palmer, M. A. Augustin PCT // Int. Appl. WO 2009079691 A1. 2009.
3. Ashokkumar M., Mason T. Sonochemistry // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley and Sons. 2007, P. 1–34.
4. Bermúdez-Aguirre D., Barbosa-Cánovas G. V. Study of butter fat content in milk on the inactivation of *Listeria innocua* ATCC 51742 by thermo-sonication. // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2008. № 9. P. 176–185.
5. Bermúdez-Aguirre D. Modeling the inactivation of *Listeria innocua* in raw whole milk treated under thermo-sonication / D. Bermúdez-Aguirre, M. G. Corradini, R. Mawson, G. V. Barbosa-Cánovas // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2009. № 10. P. 172–178.
6. Bermúdez-Aguirre D., Mawson R., Barbosa-Cánovas G. V. Microstructure of Fat Globules in Whole Milk after Thermosonication Treatment. Food Engineering and Physical Properties // JOURNAL OF FOOD SCIENCE. 2008. № 7. P. 325–331.
7. Bourke P. Effect of ultrasonic processing on food enzymes of industrial importance / P. Bourke, B. Tiwari, C. O'Donnell and P. J. Cullen // Trends in Food Science and Technology. 2010. Vol. 21 (7). P. 321–370.
8. Bund R. K., Pandit A. B. Sonocrystallization: effect on lactose recovery and crystal habit // Ultrason. Sonochem. 2007. № 14. P. 143–152.
9. Butz P., Tauscher B. Emerging technologies: chemical aspects // Food Res. Int. 2002. № 35. P. 279–284.
10. Chetana B., Chaudhari J. P., Prajapati and Suneeta V. Pinto. Ultrasound Technology for Dairy Industry // National Seminar on «Indian Dairy Industry – Opportunities and Challenges». 2015. P. 151–155.
11. Crudo D. Process intensification in food industry: hydrodynamic and acoustic cavitation for fresh milk treatment / D. Crudo, V. Bosco, G. Cavaglia, S. Mantegna, L. Battaglia, G. Cravotto // AGRO FOOD INDUSTRY HI-TECH. 2014. № 25. P. 55–60.
12. Castro L. M. D. de, Priego-Capote F. Ultrasound assisted crystallization (sonocrystallization) // Ultrason. Sonochem. 2007. № 14. P. 717–724.
13. Garcia M. A. Effect of heat and ultrasonic waves on the survival of two strains of *Bacillus subtilis* / M. A. Garcia, J. Burgos, B. Sanz, J. A. Ordóñez // J. Appl. Bacteriol. 1989. № 67. P. 619–628.
14. GEA NIRO (Ed.) Milk Powder Technology – Evaporation and Spray Drying // GEA Process Engineering A/S, Soborg Denmark. 2010. 254 p.
15. Jafari S. M., He Y., Bhandari B. Nanoemulsion production by sonication and microfluidization – a comparison // Int. J. Food Prop. 2006. № 9. P. 475–485.
16. Knorr D. Applications and potential of ultrasonics in food processing / D. Knorr, M. Zenker, V. Heinz, D. U. Lee // Trends Food Sci. Technol. 2004. № 15. P. 261–266.
17. Luque de Castro M. D., Priego-Capote F. Ultrasound assisted crystallization (sonocrystallization) // Ultrason. Sonochem. 2007. № 14. P. 717–724.
18. Martini S., Suzuki A. H., Hartel R. W. Effect of high intensity ultrasound on crystallization behavior of anhydrous milk fat // J. Am. Oil Chem. Soc. 2008. № 85. P. 621–628.
19. Mason T. J. Developments in ultrasoundnon – medical // Prog. Biophys. Mol. Biol. 2007. № 93. P. 166–175.
20. Mason T. J., Paniwnyk L., Lorimar J. P. The uses of ultrasound in food technology // Ultrason. Sonochem. 1996. № 3. P. 253–260.
21. Masuzawa N., Odhairs E. Attempts to shorten the time of lactic fermentation by ultrasonic irradiation // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. № 41. P. 3277–3278.
22. McCausland L., Cains P. Sonocrystallization using ultrasound to improve crystallization products and processes // Chem. Ind. 2003. P. 15–17.
23. Muthukumaran S. Power ultrasound offers an environmentally friendly approach to cleaning dairy UF membranes / S. Muthukumaran, S. E. Kentish, M. Ashokkumar, V. Vivekanand, R. Mawson // Aust. J. Dairy Technol. 2004. № 59. 193 p.
24. Muthukumaran S. The optimisation of ultrasonic cleaning procedures for dairy fouled ultrafiltration membranes / S. Muthukumaran, S. E. Kentish, S. Lalchandani, M. Ashokkumar, R. Mawson, G. W. Stevens, F. Grieser // Ultrason. Sonochem. 2005. № 12. P. 29–35.

25. Muthukumaran S. Frequency effects in the application of ultrasound to dairy ultrafiltration / S. Muthukumaran, S. E. Kentish, G. W. Stevens, M. Ashokkumar, R. Mawson // *J. Food Eng.* 2007. № 81 / 82. P. 364–373.
26. Muthukumaran S. The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry / S. Muthukumaran, K. Yang, A. Seuren, S. Kentish, M. Ashokkumar, G. W. Stevens, F. Grieser // *Sep. Purif. Technol.* 2004. № 39. P. 99–107.
27. Patist A., Bates D. Ultrasonic innovations in the food industry: from the laboratory to commercial production // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2008. № 9. P. 147–154.
28. Piyasena P., Mohareb E., McKellar R. C. Inactivation of microbes using ultrasound: a review // *Int. J. Food Microbiol.* 2003. № 87. P. 207–216.
29. Rez'ek Jambrak A. Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins / A. Rez'ek Jambrak, T. J. Mason, V. Lelas, L. Paniwnyk, Z. Herceg // *Journal of Food Engineering.* 2014. № 121. P. 15–23.
30. Riener J. Characterisation of volatile compounds generated in milk by high intensity ultrasound / J. Riener, F. Noci, D. A. Cronin, D. J. Morgan, J. G. Lyng // *Int. Dairy J.* 2009. № 19. P. 269–272.
31. Sakakibara M. Effect of ultrasonic irradiation on production of fermented milk with *Lactobacillus delbrueckii* / M. Sakakibara, D. Wang, K. Ikeda, K. Suzuki // *Ultrason. Sonochem.* 1994. № 1. P. 107–110.
32. Vercet A., Lopez P., Burgos J. Inactivation of heat-resistant lipase and protease from *Pseudomonas fluorescens* by manothermosonication // *J. Dairy Sci.* 1997. № 80. P. 29–36.
33. Villamiel M., van Hamersveld E. H., de Jong P. Review: effect of ultrasound processing on the quality of dairy products // *Milchwissenschaft.* 1999. № 54. P. 69–73.
34. Wan J. Emerging processing technologies for functional foods / J. Wan, R. Mawson, M. Ashokkumar, K. Ronacher, M. J. Coventry, H. Roginski, K. Versteeg // *Aust. J. Dairy Technol.* 2005. № 60. P. 167–169.
35. Westergaard V. *Milk Powder Technology Evaporation and Spray Drying.* Copenhagen, Denmark: GEA Niro, 2004. 360 p.
36. Wu H., Hulbert G. J., Mount J. R. Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2008. № 1. P. 211–218.
37. Zheng L., Sun D. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes – a review // *Trends Food Sci. Technol.* 2006. № 17. P. 16–23.
38. Zisu B. Sonocrystallisation of lactose in concentrated whey / B. Zisu, M. Sciberras, V. Jayasena, M. Weeks, M. Palmer, T. D. Dincer // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2014. № 21. P. 2117–2121.
39. Костенко К. В. Использование технологий National Instruments в автоматизации процесса обработки в роторно-импульсном аппарате / К. В. Костенко, А. А. Брацихин, Д. А. Салманова, Е. Г. Лещенко, Д. О. Лосев // *Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности: материалы II ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону».* Ставрополь: ООО ИД «ТЭСЭРА», 2014. С. 181–183.
40. Костенко К. В. Исследование свойств растворов молочной сыворотки в активированных средах / К. В. Костенко, А. А. Брацихин, Д. А. Салманова, Е. Г. Лещенко, Д. О. Лосев // *Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности: материалы III ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону».* Ставрополь: ООО ИД «ТЭСЭРА», 2015. С. 247–250.
41. Костенко К. В. Оптимизация процесса восстановления молочной сыворотки методом кавитационной дезинтеграции / К. В. Костенко, А. А. Брацихин, Д. А. Салманова, Е. Г. Лещенко // *Вестник СКФУ.* 2015. № 5(50). С. 7–13.