



УДК 616-003.725: 546.72.

<https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-1-25>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ МОЛОКА ХЕЛАТНЫМ СМЕШАННОЛИГАНДНЫМ КОМПЛЕКСОМ ЖЕЛЕЗА*

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Андрей Владимирович Блинов, канд. техн. наук, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
Александр Владимирович Серов, д-р техн. наук, доцент, профессор департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
Артем Владимирович Самоволов, ассистент кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии института нефтегазовой инженерии
Алина Салмановна Аскерова, лаборант департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
Кристина Сергеевна Сляднева, студент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
Зафар Абдулович Рехман, ассистент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования института перспективной инженерии
E-mail: zafrehman1027@gmail.com
Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Целью данной работы было исследование влияния концентрации аскорбатоникотината железа на органолептические и физико-химические показатели молока. Синтез аскорбатоникотината железа проводили механохимическим методом. Для получения комплекса использовались следующие реактивы: аскорбиновая кислота, никотиновая кислота, сульфат железа (II), бария гидроокись 8-водная. В результате исследований физико-химических характеристик установлено, что внесение аскорбатоникотината железа с различной концентрацией в молоко не оказывало значительного влияния на такие показатели как активная кислотность среды, поверхностное натяжение, титруемая кислотность и электропроводность. Однако наблюдалось различие в радиусе частиц коллоидной фазы молока в зависимости от концентрации вносимой железосодержащей добавки. Наименьший гидродинамический радиус мицелл дисперсной фазы молока наблюдался при внесении хелатного комплекса железа, содержащего 30 и 50 % от суточной нормы железа. При анализе гистограмм распределения гидродинамического радиуса установлено, что образцы молока имели мономодальное распределение частиц. Изучено влияние концентрации железосодержащего комплекса на органолептические свойства молока. Установлено, что вкус и запах молочного продукта при добавлении аскорбатоникотината железа незначительно изменяется по сравнению с контрольным образцом. Однако наилучшими характеристиками обладали молочные напитки, обогащенные тройными хелатными комплексами, содержащими 10, 30 и 50 % от суточной нормы железа. Цвет полученных напитков изменяется от молочно-белого, свойственного обычному молоку (при внесении 10 % суточной нормы железа) к розоватому оттенку (при внесении 100 % от суточной нормы железа), что связано с цветом самого хелатного железа. В работе рассмотрена возможность обогащения молока аскорбатоникотинатом железа, что положительно влияет на качество и свойства молока.

Ключевые слова: молоко, аскорбатоникотинат железа, физико-химические параметры, органолептические свойства, мицеллы, гидродинамический радиус

Для цитирования: Исследование процесса обогащения молока хелатным смешаннолигандным комплексом железа / А. В. Блинов, А. В. Серов, А. В. Самоволов [и др.] // Молочная промышленность. 2025. № 1. С. 42–47. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-1-25>

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-10063, <https://rscf.ru/project/24-76-10063/>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема недостаточного поступления в организм человека эссенциальных макро- и микро-нутриентов приобретает широкомасштабный характер и охватывает различные группы населения многих регионов мира [1]. Микроэлементами являются минералы, которые попадают в организм человека с пищей. Эти вещества необходимы в малых количествах для нормального функционирования организма [2]. Благодаря своим биохимическим свойствам эссенциальные микроэлементы участвуют в функционировании и формировании тканей и органов организма [3]. К числу этих элементов относятся металлы (Mn, Cu, Zn, Fe, Co, Cr), галогены и другие химические элементы [4].

Одним из таких элементов является железо. Оно относится к эссенциальным (незаменимым) микроэлементам и наряду с другими участвует во множестве процессов в организме человека. Дефицит железа приводит к уменьшению снабжения клеток кислородом [5]. Также железо – микроэлемент, который участвует в биологическом процессе формирования красных кровяных телец – эритроцитов [6], нехватка последних может привести к анемии. Помимо этого, из-за нехватки железа в организме возникают нарушения в сердечно-сосудистой, нервной системах, а также в органах дыхания и пищеварения [7].

Взаимосвязь между метаболизмом различных микроэлементов основана на антагонистических или синергических взаимодействиях. Была выявлена связь между уровнем общих кишечных транспортеров железа и других двухвалентных металлов. Нехватка железа в организме может привести к дисбалансу других микроэлементов [8].

Неорганические соединения железа плохо усваиваются, однако органические соединения двухвалентного железа гораздо лучше подходят для восполнения распространенного железодефицита. Для обогащения организма усвояемым железом разработано множество его биоактивных форм, а также продуктов и добавок на их основе [9]. Считается, что хелатные формы металлов обладают большей биодоступностью по сравнению с неорганическими (сульфат железа) аналогами [10].

Одними из наиболее подходящих веществ для образования комплексов железа выступают незаменимые аминокислоты и водорастворимые витамины, так как они повышают всасывание железа. Аскорбиновая кислота (витамин С) усиливает усвоение ионов железа, а использование в качестве еще одного хелатирующего агента незаменимой аминокислоты позволяет увеличить биологическую активность комплекса [11].

Одним из способов повышения количества микроэлементов в рационе населения является обогащение продуктов питания эссенциальными микроэлементами¹.

Пищевые продукты, обогащенные тройными комплексами эссенциального железа с витаминами и аминокислотами, могут выступать в роли дополнительного источника жизненно необходимых нутриентов с целью поддержания элементного состава организма [12]. Одним из наиболее перспективных продуктов для обогащения является молоко [13]. По соотношению количества питательных веществ к единице объема молоко является одним из самых востребованных продуктов питания [14].

Известны способы обогащения молока необходимыми питательными веществами. Так, например, учеными был получен молочный напиток, обогащенный наночастицами селена [15]. Известны случаи обогащения молока хелатным комплексом железа с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами [16]. Также существует исследование, посвященное аскорбатотреонинату железа и его влиянию на молоко [17]. Таким образом, молоко, обогащенное хелатными комплексами эссенциальных микроэлементов, обладает высокими антиоксидантными свойствами.

Актуальность данного исследования заключается в обогащении продуктов питания (молоко) хелатным железом в высокоусвояемой форме для лечения и профилактики железодефицитных состояний. Ввиду перспективного применения материала, **целью работы** стало исследование физико-химических и органолептических показателей молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа (II).

¹Мазуренко, Е. А. Высокие технологии обогащения химического состава пищевых продуктов эссенциальными компонентами / Е. А. Мазуренко, В. С. Гринченко, М. П. Бахмет // Наука и инновации - современные концепции : Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. – Москва: Инфинити, 2020. – С. 112–117. <https://www.elibrary.ru/tpyach>

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для синтеза аскорбатоникотината железа использовались следующие вещества и реактивы: аскорбиновая кислота, никотиновая кислота, сульфат железа (II), бария гидроксид 8-водная. Синтез проводился следующим образом: аскорбиновую кислоту соединяли с никотиновой кислотой в отношении 1:1 и перемешивали, затем к полученному раствору добавляли гидроксид бария 8-водного, сульфат железа (II) и дистиллированную воду для дальнейшего центрифугирования при 3000 об/мин для удаления побочных продуктов. Операцию центрифугирования проводили 3 раза.

Проводили исследование следующих физико-химических параметров образцов молока, обогащенных аскорбатоникотинатом железа: активная кислотность среды, титруемая кислотность среды, поверхностное натяжение, электропроводность, средний гидродинамический радиус.

Проводили обогащение молока хелатным комплексом железа. В рамках эксперимента использовали цельное молоко жирностью 3,2 % (АО «МКС», Ставрополь), которое не подвергалось пастеризации. В качестве контрольного молока выступало цельное молоко без добавок. Образец 1 обогащали хелатным комплексом железа из расчета 1 мг железа на 100 мл молока, что соответствует 10 % от суточной нормы железа. Образец 2 – хелатный комплекс железа из расчета 3 мг железа на 100 мл молока, 30 % от суточной нормы.

Образец 3 – хелатный комплекс железа из расчета 5 мг железа на 100 мл молока, 50 % от суточной нормы. Образец 4 – хелатный комплекс железа из расчета 7 мг железа на 100 мл молока, 70 % от суточной нормы. Образец 5 – хелатный комплекс железа из расчета 10 мг железа на 100 мл молока, 100 % от суточной нормы.

Исследование активной кислотности среды проводили с использованием pH-метра OHAUS ST300-B (OHAUS Corporation, КНР). Титруемую кислотность определяли согласно ГОСТ 3624-98 «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности». Поверхностное натяжение определяли сталагмометрическим методом. Определение электропроводности мицелл осуществлялось методом акустической и электроакустической спектроскопии на спектрометре DT 1202 («DISPERSION TECHNOLOGY» INC, USA). Измерение среднего гидродинамического радиуса образцов молока проводили методом динамического рассеяния света на приборе Photocor-Complex (ООО «Антек-97», Россия). Компьютерную обработку полученных результатов осуществляли с использованием программного обеспечения DynaLS.

Также были проведены исследования по влиянию аскорбатоникотината железа на органолептические показатели молока согласно методикам ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011 «Молоко и молочные продукты. Органолептический анализ. Часть 2. Рекомендуемые методы органолептической оценки».

Источник изображения: pixabay.com



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе проводили исследование физико-химических показателей молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа.

В таблице 1 представлены результаты исследования физико-химических параметров.

На рисунке 1 приведены гистограммы распределения гидродинамического радиуса мицелл дисперсной фазы молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа, содержащего 10, 30, 50, 70 и 100 % от суточной дозы железа.

По результатам, представленным в таблице 1, можно отметить, что введение аскорбатоникотината железа при различной концентрации в молоко не оказывает влияния на физико-химические показатели. Полученные значения находятся в сопоставимом диапазоне

по сравнению с контрольным образцом. Однако, при внесении различной дозы аскорбатоникотината железа меняется средний гидродинамический радиус мицелл дисперсной фазы молока. При внесении комплекса с содержанием железа 30, 50 и 70 % от суточной дозы (образцы 2, 3, 4) радиус мицелл белковых компонентов находится в нанометровом диапазоне, при введении аскорбатоникотината железа с концентрацией 10 и 100 % (образцы 1 и 5) отмечается укрупнение частиц.

Из полученных гистограмм можно сделать вывод о том, что распределение гидродинамического радиуса мицелл дисперсной фазы молока, обогащенного тройным хелатным комплексом эссенциального железа – аскорбатоникотината железа, является мономодальным вне зависимости от концентрации железосодержащей добавки.

Таблица 1. Физико-химические параметры молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа

| Наименование образца | pH | Титруемая кислотность, °Т | Поверхностное натяжение, Н/м | Электропроводность, См/м | Средний гидродинамический радиус, нм |
|----------------------|------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Контроль | 6,85 | 20 | 0,08635 | 4,78 | 52 |
| Образец 1 | 6,87 | 20 | 0,08813 | 4,74 | 381 |
| Образец 2 | 6,87 | 20 | 0,08902 | 4,70 | 62 |
| Образец 3 | 6,88 | 19 | 0,08813 | 4,75 | 59 |
| Образец 4 | 6,88 | 19 | 0,08813 | 4,73 | 36 |
| Образец 5 | 6,89 | 20 | 0,08902 | 4,76 | 1368 |

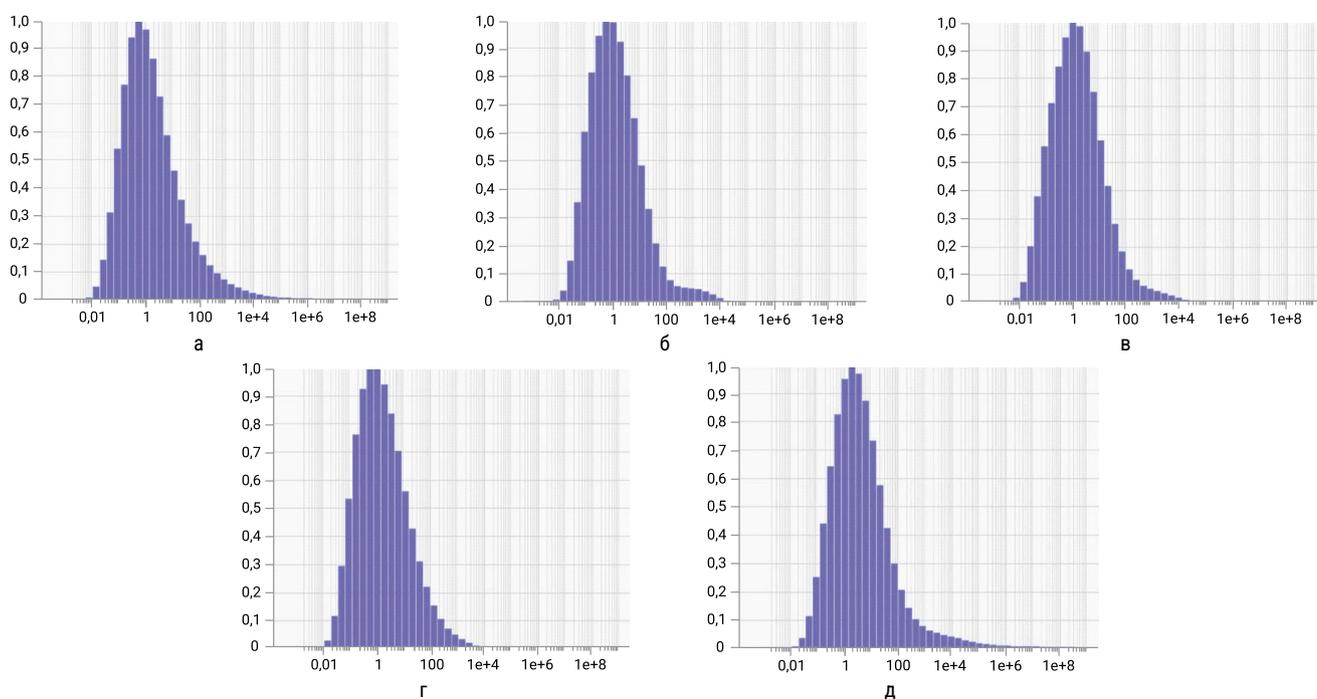


Рисунок 1. Гистограммы распределения среднего гидродинамического радиуса мицелл дисперсной фазы молока, обогащенного никотинатоаскорбатом железа: а) образец 1; б) образец 2; в) образец 3; г) образец 4; д) образец 5



Источник изображения: pixabay.com

На втором этапе исследования были проведены эксперименты по влиянию концентрации аскорбатоникотината железа на органолептические свойства молока. На рисунке 2 представлен внешний вид образцов молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа. Результаты исследования органолептических свойств молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа, приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 наглядно видно, что органолептические показатели молока, обогащенного тройным хелатным комплексом эссенциального железа – аскорбатоникотинатом железа, имеют дегустационные оценки от 4,79 (образец 1, содержание 10 % суточной нормы железа) до 4,31 (образец 5, содержание 100 % суточной нормы железа).

На рисунке 2 можно заметить, что при содержании 10 % суточной нормы железа (образец 1) молоко имеет свойственный ему цвет, при повышении концентрации цвет молока становится более розовым, что объясняется цветом самого раствора

аскорбатоникотината железа. Тем не менее, несмотря на специфическое окрашивание молока, оно может использоваться для получения продуктов функционального питания, где цвет не имеет большого значения (например, йогурты).

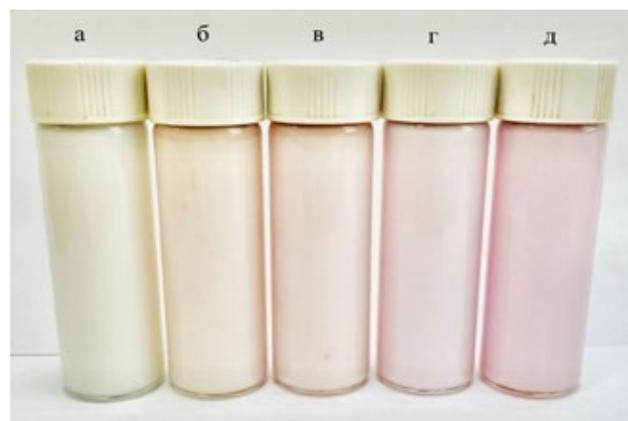


Рисунок 2. Внешний вид образцов молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа: а) образец 1; б) образец 2; в) образец 3; г) образец 4; д) образец 5

Таблица 2. Органолептические свойства молока, обогащенного аскорбатоникотинатом железа

| Наименование образца | Запах и вкус | Оценка, баллы (по 5-балльной шкале) |
|----------------------|--|-------------------------------------|
| Контроль | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,84 |
| Образец 1 | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,79 |
| Образец 2 | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,71 |
| Образец 3 | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,67 |
| Образец 4 | Недостаточно выраженный, пустой, без посторонних запахов и привкусов | 4,53 |
| Образец 5 | Недостаточно выраженный, пустой, без посторонних запахов и привкусов | 4,31 |

Выводы

Был проведен механохимический синтез тройного хелатного комплекса эссенциального железа – аскорбатоникотината железа, в качестве прекурсора использовался сульфат железа. Далее проводилось обогащение молока тройным хелатным железосодержащим комплексом и исследовались физико-химические свойства полученных напитков. Установлено, что физико-химические параметры незначительно изме-

няются при добавлении хелатного комплекса железа. Органолептический анализ показал, что молоко, обогащенное тройными хелатными комплексами эссенциального микроэлемента железа с содержанием железа 10, 30 и 50 % от суточной нормы, обладает наилучшими характеристиками и полученные продукты можно рекомендовать для внедрения на предприятиях молочной промышленности для профилактики железодефицитных состояний у населения. ■

FUNCTIONAL MILK PRODUCT FORTIFIED WITH IRON MIXED-LIGAND CHELATE COMPLEX

Andrey V. Blinov, Alexander V. Serov, Artem V. Samovolov, Alina S. Askerova, Kristina S. Slyadneva, Zafar A. Rekhman
North Caucasian Federal University, Stavropol

ORIGINAL ARTICLE

Ferrous ascorbate nicotinate has a concentration-dependent effect on the sensory and physicochemical profile of milk. In this study, it was synthesized using a mechanochemical method with such reagents as ascorbic acid, nicotinic acid, iron (II) sulfate, and barium hydroxide 8-water. Different concentrations of ferrous ascorbate nicotinate had no significant effect on active acidity, surface tension, titratable acidity, and electrical conductivity. However, the radius of the particles in the colloidal phase depended on the concentration of the iron-containing additive. At 30 and 50 % daily iron intake, the chelate iron complex resulted in the smallest hydrodynamic radius of the micelles in the dispersed phase of milk. As for the hydrodynamic radius, the milk samples had a monomodal particle distribution. As for the sensory profile, the new product was slightly different from the control sample in taste and smell. The best sensory score belonged to the samples with iron chelate complex containing 10, 30, and 50 % daily iron intake. At 10 %, the color was milky white. At 100 %, it turned pinkish, i.e., the color of chelated iron. In general, the new milk product fortified with ferrous ascorbate nicotinate demonstrated good consumer properties.

Keywords: milk, ferrous ascorbate nicotinate, physicochemical properties, sensory profile, micelles, hydrodynamic radius

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коденцова, В. М.** Обеспеченность населения России микронутриентами и возможности ее коррекции. Состояние проблемы / В. М. Коденцова, О. А. Вржесинская, Д. В. Рисник [и др.] // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 4. С. 113–124. <https://elibrary.ru/zftklt>
2. **Скальный, А. В.** Микроэлементы: бодрость, здоровье, долголетие / А. В. Скальный. – М.: Эксмо, 2010. – 286 с.
3. **Djordjevic, B.** Vitamins, microelements and the immune system: Current standpoint in the fight against COVID-19 / B. Djordjevic [et al.] // British Journal of Nutrition. 2022. Vol. 128(11). <https://doi.org/10.1017/S0007114522000083>
4. **Renata, R. B. N.** Immunomodulatory role of microelements in COVID-19 outcome: a relationship with nutritional status / R. B. N. Renata [et al.] // Biological trace element research. 2023. Vol. 201(4). P. 1596–1614. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03290-8>
5. **Pasricha, S. R.** Iron deficiency / S. R. Pasricha [et al.] // The Lancet. 2021. Vol. 397(10270). P. 233–248. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)32594-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)32594-0)
6. **Lungu, I. I.** A review of essential microelements in the immune system / I. I. Lungu, [et al.] // International Journal of Immunology. 2022. Vol. 10(1). P. 1–4. <https://doi.org/10.11648/j.iji.20221001.11>
7. **Camaschella, C.** Iron deficiency / C. Camaschella // Blood, The Journal of the American Society of Hematology. 2019. Vol. 133. № 1. P. 30–39. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-05-815944>
8. **Блинов, А. В.** Аскорбатотренионат железа (II) – новая хелатная форма эссенциального железа для обогащения продуктов питания / А. В. Блинов, А. Б. Голик, А. А. Гвозденко // Индустрия питания. 2024. Т. 9. № 1. С. 82–90. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-1-9>; <https://elibrary.ru/yvppga>
9. **Minzanova, S. T.** Complexation of pectin with macro- and microelements. Antianemic activity of Na, Fe and Na, Ca, Fe complexes / S. T. Minzanova [et al.] // Carbohydrate polymers. 2015. Vol. 134(10). P. 524–533. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.07.034>
10. **Wu, W.** Food protein-derived iron-chelating peptides: The binding mode and promotive effects of iron bioavailability / W. Wu [et al.] // Food Research International. 2020. Vol. 131. 108976. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108976>
11. **Xu, P.** Ascorbic acid enhanced the zero-valent iron/peroxy monosulfate oxidation: Simultaneous chelating and reducing / P. Xu [et al.] // Separation and Purification Technology. 2022. Vol. 298. 121599. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121599>
12. **Блинов, А. В.** Функциональный молочный напиток, обогащенный аскорбатотренионатом железа (II) / А. В. Блинов, Д. Г. Маглакелидзе, А. А. Гвозденко [и др.] // Индустрия питания. 2023. Т. 8. № 3. С. 87–96. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2023-8-3-9>; <https://elibrary.ru/qqrqfk>
13. **Розанова, Т. П.** Рынок молока и молочной продукции России: тенденции и перспективы / Т. П. Розанова, А. Н. Д. Магомедов // Вестник Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. 2013. № 2(56). С. 45–54. <https://elibrary.ru/pwgxvh>
14. **Rzhepakovsky, I.** Anti-arthritis effect of chicken embryo tissue hydrolyzate against adjuvant arthritis in rats (X-ray microtomographic and histopathological analysis) / I. Rzhepakovsky [et al.] // Food Science & Nutrition. 2021. Vol. 9(10). P. 5648–5669. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2529>
15. **Блинов, А. В.** Влияние наночастиц селена на органолептические показатели и хранимоспособность кисломолочного напитка / А. В. Блинов, И. А. Евдокимов, А. Д. Лодыгин [и др.] // Молочная промышленность. 2024. № 5. С. 26–30. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-5-7>; <https://elibrary.ru/mgprwmz>
16. **Костенко, К. В.** Оптимизация технологии получения функционального молочного напитка, обогащенного эссенциальным микроэлементом цинком / К. В. Костенко, А. В. Блинов, Ф. А. Пойдун [и др.] // Индустрия питания. 2024. Т. 9. № 3. С. 79–89. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-3-8>; <https://elibrary.ru/szmubr>
17. **Блинов, А. В.** Аскорбатотренионат железа (II) – новая хелатная форма эссенциального микроэлемента железа / А. В. Блинов, А. Б. Голик, А. А. Гвозденко [и др.] // Индустрия питания. 2024. Т. 9. № 1. С. 82–90. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-1-9>; <https://elibrary.ru/yvppga>