

Технологические подходы к переработке молочной сыворотки для последующего применения в промышленных целях*

Ольга Михайловна Шухалова, канд. техн. наук, руководитель отдела микробиологических исследований

E-mail: o.shukhalova@fnccps.ru

Татьяна Алексеевна Волкова, канд. техн. наук, ученый секретарь

E-mail: t.volkova@fnccps.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, г. Углич

Молочная сыворотка, являясь побочным продуктом производства, представляет собой ценный ресурс, содержащий до 50 % питательных веществ исходного молока. Современные методы ее переработки решают три ключевые задачи: максимальное извлечение ценных компонентов (сывороточных белков, лактозы, минеральных веществ), минимизация экологической нагрузки и расширение областей промышленного применения. Ультрафильтрация позволяет концентрировать белки (до 80 % сухого вещества), нанофильтрация обеспечивает деминерализацию и концентрирование (до 18–20 % сухого вещества), а обратный осмос позволяет сконцентрировать молочную сыворотку до массовой доли сухих веществ 18–20 %. Ионообменная хроматография дополняет эти методы, обеспечивая фракционирование белковых компонентов для фармацевтических целей. Сущность электрохимической обработки заключается в создании концентрации анионов и катионов, которая соответствует изоэлектрической точке коагуляции белков, посредством пропускания электрического тока через молочную сыворотку, находящуюся между электродами, разделенными ионопроницаемой мембраной. Ферментативный гидролиз открывает возможности для получения биоактивных пептидов с доказанными антиоксидантными, антимикробными и гипотензивными свойствами. Каждый из этих методов обладает определенными преимуществами и ограничениями. Например, мембранные процессы требуют тщательной предварительной подготовки молочной сыворотки. Недостатком мембранных методов считается явление концентрационной поляризации, термические методы отличаются высокой энергоемкостью, а ферментативные зависят от активности и стабильности ферментных препаратов. Комбинирование методов позволяет достигать глубокой степени переработки и селективного выделения целевых фракций из молочной сыворотки. Совершенствование технологий переработки молочной сыворотки открывает новые возможности для ее рационального использования, способствуя переходу к экономике замкнутого цикла в молочной отрасли. В данной статье рассматриваются различные методы обработки молочной сыворотки, их эффективность, преимущества и перспективы внедрения для последующего широкого применения в промышленных целях.

Ключевые слова: молочная сыворотка, методы переработки, мембранные технологии, центрифугирование, деминерализация, ферментативный гидролиз

Для цитирования: Шухалова, О. М. Технологические подходы к переработке молочной сыворотки для последующего применения в промышленных целях / О. М. Шухалова, Т. А. Волкова // Сыроделие и маслоделие. 2025. № 4. С. 40–46. <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-4-39>

Введение

Текущий уровень переработки молочной сыворотки на предприятиях молочной отрасли остается недостаточным и не превышает 45 %. Однако рациональное использование этого ценного вида побочного молочного сырья способно принести предприятиям целый ряд существенных преимуществ. Прежде всего, это повышение общей товарности молока за счет вовлечения в производственный цикл дополнительных ресурсов, что ведет к снижению себестоимости основной продукции. Кроме того, переработка сыворотки открывает возможности для получения дополнительной прибыли от реализации новых видов продукции

высокой биологической ценности, сокращая при этом негативное влияние на экологическую среду в зоне ответственности молочных предприятий.

На сегодняшний день промышленность осваивает новые и перспективные технологии переработки молочной сыворотки, включая физические, химические и биотехнологические методы. У каждого есть свои преимущества, свои достоинства, но есть и недостатки.

Особую актуальность в этом контексте приобретают современные инновационные технологии

* Работа сделана в рамках Госзадания по теме FGUS–2024–0007.

переработки, основанные на комплексном применении механических, мембранных, химических, электрохимических и биологических методов. Такой комбинированный подход позволяет максимально полно использовать потенциал сырья на всех этапах технологической цепочки. В результате предприятия получают возможность производить высокомаржинальные продукты функционального, диетического и лечебного питания с целью профилактики метаболических нарушений.

Таким образом, внедрение прогрессивных методов переработки молочной сыворотки представляет собой стратегически важное направление развития молочной отрасли. Это не только повышает экономическую эффективность молокоперерабатывающих предприятий за счет более рационального использования ресурсов и создания новых источников дохода, но и способствует формированию рынка полезных пищевых продуктов с высокой добавленной стоимостью, одновременно снижая экологическую нагрузку на окружающую среду.

Цель исследования – анализ современных технологий переработки молочной сыворотки, включая физические, химические и биотехнологические методы, их достоинства и недостатки, оценка возможности использования комбинированных методов для переработки молочной сыворотки.

Объекты и методы исследования

В данной статье рассматриваются различные методы обработки молочной сыворотки, их эффективность, преимущества и перспективы внедрения для последующего широкого применения в промышленных целях. Основным методом исследования являлся анализ представленной в научных источниках информации о способах переработки молочной сыворотки. Материалом исследования послужили научные статьи на русском и английском языках. Поиск публикаций осуществлялся в электронных библиотеках и поисковых системах eLIBRARY.RU, CyberLeninka, Google Scholar, ScienceDirect по ключевым словам: переработка молочной сыворотки, мембранные технологии, центрифугирование, деминерализация, ферментативный гидролиз, whey processing, membrane technologies, centrifugation, demineralization, enzymatic hydrolysis.

Результаты и их обсуждение

Молочная сыворотка, являясь побочным продуктом сыроделия, казеинового и творожного производства, содержит ценные компоненты, такие как сывороточные белки, лактоза, минеральные вещества и витамины. Однако ее промышленное использование требует предварительной обработки для удаления микроорганизмов и нежелательных примесей. Современные технологии переработки молочной сыворотки включают комплекс методов, каждый из которых обладает специфическими преимуществами и областями применения.

Физические методы переработки молочной сыворотки занимают важное место в современных технологических процессах переработки благодаря своей эффективности и способности сохранять натуральные свойства продукта [1]. Среди ключевых физических методов следует выделить ультрафильтрацию и микрофильтрацию, обратный осмос и центрифугирование. Каждый из данных методов решает специфические задачи в процессе очистки и концентрирования сыворотки [2, 3].



Источник изображения: freerik.com

Мембранные технологии занимают ключевое место в переработке молочной сыворотки, поскольку позволяют не только очищать, но и концентрировать ее ценные компоненты [4, 5]. Микрофилтрация с использованием мембран с порами от 0,1 до 10 мкм позволяет эффективно удалять бактерии, жировые глобулы и мелко-дисперсные частицы, обеспечивая осветление сыворотки без существенного изменения ее белкового состава [6]. Этот метод особенно важен на начальных этапах обработки, т. к. подготавливает сырье для последующих стадий очистки [7]. Ультрафилтрация, работающая с мембранами, имеющими размер пор от 1 до 100 нм, дает возможность отделять белки от таких компонентов, как лактоза, минеральные соли и вода. В результате этого процесса получают ценный концентрат сывороточных белков, который находит широкое применение в пищевой промышленности, производстве спортивного питания и фармацевтических препаратов. Важным преимуществом ультрафилтрации является возможность работы при щадящих температурных режимах, что позволяет сохранить исходную структуру белков [8, 9].

Мембранные методы требуют регулярной промывки мембран для предотвращения их засорения и поддержания стабильной производительности. Современные установки оснащаются автоматизированными системами обратной промывки, что значительно повышает их эксплуатационную эффективность [10, 11].

Обратный осмос, использующий мембраны с порами менее 1 нм, представляет собой способ концентрирования сыворотки и удаления низкомолекулярных соединений. Этот процесс играет ключевую роль в подготовке сыворотки к сушке, существенно снижая энергозатраты на последующее выпаривание. Основное преимущество обратного осмоса заключается в возможности работы при низких температурах, что исключает риск термической денатурации ценных белковых компонентов. Однако следует учитывать, что данный метод требует создания высокого рабочего давления, что приводит к значительному энергопотреблению. Для оптимизации процесса часто применяют многоступенчатые системы, что позволяет достичь более глубокой степени разделения компонентов¹ [12–14].

Центрифугирование, традиционный физический метод механической очистки, остается незаменимым для первичной обработки сыворотки. Принцип действия основан на разделении компонентов под действием центробежной силы, что позволяет эффективно удалять остатки молочного жира и твердые частицы, включая казеиновую пыль и механические примеси. Современные центрифуги оснащены барабанами, работающими по принципу частичной разгрузки путем пульсации подвижного днища, находящегося внутри. Для повышения эффективности процесса часто применяют предварительный нагрев сыворотки до 45 ± 5 °C, что снижает ее вязкость и улучшает разделение фаз [15, 16].

Физические методы переработки молочной сыворотки, включая мембранные технологии и центрифугирование, образуют комплексную систему, позволяющую получать продукты различной степени очистки и концентрирования. Эти методы отличаются экологической безопасностью, т. к. не требуют использования химических реагентов, позволяют сохранить биологическую ценность исходного сырья. Современные тенденции развития физических методов очистки направлены на повышение энергоэффективности оборудования, автоматизацию технологических процессов и снижение эксплуатационных затрат. Особое внимание уделяется разработке новых мембранных материалов с улучшенными характеристиками, которые позволяют увеличить срок службы мембран и повысить селективность разделения [17, 18]. Комбинация различных физических методов, таких как предварительное центрифугирование с последующей ультрафилтрацией и обратным осмосом, позволяет создавать гибкие технологические схемы, адаптированные под конкретные требования производства. Эти технологии открывают широкие возможности для глубокой переработки молочной сыворотки с получением высококачественных продуктов, востребованных в различных отраслях пищевой промышленности. Дальнейшее совершенствование физических методов очистки сыворотки связано с внедрением интеллектуальных систем контроля и управления процессами, что позволит оптимизировать технологические параметры в реальном времени и обеспечит стабильное качество готовой продукции [17, 18].

¹ Справочник по переработке молочной сыворотки. Технологии, процессы и аппараты, мембранное оборудование / Г. Б. Гаврилов, А. Ю. Просеков, Э. Ф. Кравченко, Б. Г. Гаврилов. – СПб.: Профессия, 2015. – С. 12–14.

Химические методы обработки молочной сыворотки занимают важное место в современной перерабатывающей промышленности, предлагая эффективные решения для выделения ценных белковых компонентов. Данные методы представляют собой комплекс технологических процессов, основанных на химических реакциях и физико-химических взаимодействиях.

В процессе переработки молочной сыворотки особое значение имеет этап деминерализации, который может реализовываться двумя принципиально разными способами [19]. Наиболее распространенным способом является ионообменная технология. Она основана на использовании сульфокатионитов в H^+ -форме и анионитов в OH^- -форме, которые при последовательном прохождении через них сыворотки обеспечивают высокую степень очистки – до 95 % минеральных веществ. Однако за этой высокой эффективностью скрываются определенные технологические сложности. Метод требует тщательной предварительной подготовки сырья и, что особенно важно, связан с образованием значительных объемов промывных вод в процессе регенерации ионообменных смол [19].

Эти ограничения привели к разработке альтернативного подхода – электродиализа, который принципиально отличается по своему механизму действия. В основе этого метода лежит принцип селективного транспорта ионов через специальные мембраны под воздействием электрического поля. Степень деминерализации здесь достигает 50–90 %, при этом электродиализ обладает рядом неоспоримых преимуществ. В частности, он требует значительно меньшего количества реагентов, но при этом следует отметить, что этот эффект достигается за счет повышенных энергозатрат, что может быть критичным для некоторых производств [16].

Развитие этих методов идет по пути их комбинирования и оптимизации, позволяя находить баланс между эффективностью очистки, экономической целесообразностью и экологической безопасностью [17, 18].

Особое значение в переработке сыворотки имеет гидролиз лактозы, который может проводиться как кислотным, так и ферментативным методами.



Источник изображения: freepik.com

Кислотный гидролиз, осуществляемый при высоких температурах нагревания, низких значениях активной кислотности и с использованием кислот (100–150 °С, pH 1,0–2,0, с использованием HCl или H₂SO₄), хотя и отличается экономичностью, приводит к образованию побочных продуктов и частичной деградации белков [19, 20].

В отличие от кислотного, ферментативный гидролиз с применением β -галактозидаз микробного происхождения проходит в более щадящих условиях (30–50 °С, pH 4,5–6,5), хотя требует точного контроля активности ферментов и последующей их инактивации [21, 22].

Осаждение белковых фракций с использованием термокислотной коагуляции представляет собой еще один важный аспект сывороточной переработки. Термическое осаждение при 85–95 °С вызывает денатурацию термоллабильных протеинов, в то время как изоэлектрическое осаждение в точке pH 4,5–5,0 позволяет селективно выделять отдельные белковые компоненты [23–25].

В передовых технологиях все чаще используются комбинированные подходы, гармонично сочетая при этом контролируемое температурное воздействие с точно дозированной кислотной обработкой [19]. Такой симбиоз методов позволяет достичь наилучшего эффекта – температурный фактор усиливает действие кислоты, а кислотная обработка, в свою очередь, повышает чувствительность белков к тепловому воздействию. В результате значительно возрастает селективность процесса, что особенно важно при работе с ценными сывороточными белками. Подобные интегрированные подходы открывают новые возможности для создания экономически выгодных и экологически безопасных технологий переработки молочной сыворотки [19].

Современные химические методы переработки молочной сыворотки продолжают развиваться в направлении повышения эффективности, снижения энергозатрат и минимизации экологического воздействия. Внедрение новых каталитических систем, включая использование иммобилизованных ферментов,

и совершенствование существующих технологических схем открывают новые возможности для глубокой переработки этого ценного сырья в продукты пищевого, фармацевтического и технического назначения.

Биотехнологические методы переработки молочной сыворотки предполагают комплексный подход, делая ее источником ценных биологически активных соединений [26, 27]. Среди наиболее перспективных направлений особого внимания заслуживает биокаталитический синтез лактулозы – пребиотического дисахарида с доказанными полезными для здоровья свойствами. Этот процесс реализуется через двухстадийную ферментативную трансформацию: сначала β -галактозидаза осуществляет гидролиз лактозы до моносахаридов, затем те же ферментные системы катализируют транскгликозидацию с образованием лактулозы [28, 29]. Альтернативный подход – прямая изомеризация с использованием целлобиозо-2-эпимеразы – демонстрирует особую эффективность, достигая степени конверсии до 85 % при сохранении высокой чистоты продукта² [30–32].

Не менее важным направлением является ферментативный гидролиз компонентов сыворотки, где комплекс иммобилизованных ферментов (лактаз, протеаз, липаз) работает согласованно, обеспечивая не только расщепление лактозы, но и модификацию белковых фракций. Результатом становятся гипоаллергенные продукты с повышенной биодоступностью питательных веществ и ценными пептидными фракциями.

Микробная биоконверсия открывает дополнительные возможности переработки. Аэробная ферментация с использованием культур дрожжей (*Kluyveromyces*, *Candida*) позволяет получать кормовые белки, экзополисахариды и ферментные препараты. В то же время анаэробное сбраживание метаногенными сообществами преобразует сыворотку в биогаз (содержащий 55–75 % метана), водород или летучие жирные кислоты [33].

Современные разработки сосредоточены на создании гибридных биотехнологических систем, объединяющих ферментативные и микробные

² Рябцева, С. А. Получение и применение лактулозы: 10 лет спустя / С. А. Рябцева [и др.] // Переработка молока. 2017. № 10. С. 64–67. <https://elibrary.ru/zrqngqr>

процессы. Особый интерес представляют микробные электросинтетические установки, фотоферментативные биореакторы и каскадные мембранные системы с иммобилизованными биокатализаторами. Такие комплексные решения позволяют создавать безотходные производства, где молочная сыворотка становится источником широкого спектра продуктов – от функциональных пищевых ингредиентов и фармацевтических субстанций до биотоплива, демонстрируя безотходность переработки в молочной промышленности.

Таким образом, биотехнологический подход к переработке молочной сыворотки не только решает экологические проблемы молочной промышленности, но и создает экономически значимые продукты с высокой добавленной стоимостью. Дальнейшее развитие этих методов будет способствовать внедрению принципов глубокой переработки молочного сырья, обеспечивая рациональное использование ресурсов и минимизацию экологических рисков.

Выводы

Современные технологии переработки молочной сыворотки, включая физические, химические и биотехнологические методы, демонстрируют значительный прогресс в создании безотходных, энергоэффективных и экологически устойчивых производств.

Использование инновационных подходов, таких как мембранное разделение, гибридные биотехнологии и каталитические процессы, позволяет не только решить экологические проблемы, но и получать высокомаржинальные продукты для пищевой, фармацевтической и химической промышленности. Развитие этих направлений способствует экономичности молокопереработки, превращая побочные продукты молочного производства в ценные ресурсы, что уменьшает экологическую нагрузку и повышает эффективность работы молочной отрасли. Таким образом, совершенствование технологий глубокой переработки молочной сыворотки открывает новые перспективы для устойчивого развития пищевой промышленности. ■

Поступила в редакцию: 29.05.2025

Принято в печать: 15.10.2025

Technological Approaches to Industrial Whey Processing

Olga M. Shukhalova, Tatiana A. Volkova

All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking – Branch of V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS, Uglich

Whey is a by-product of dairy production. This valuable resource contains up to 50% of all nutrients in the original milk. Modern dairy science has to solve three key tasks: 1) efficient extraction of such valuable components as proteins, lactose, and minerals; 2) environmental sustainability; 3) new industrial applications. This article reviews various methods of whey processing, their effectiveness, advantages, limitations, and industrial prospects. Ultrafiltration makes it possible to reach 80% protein concentration (dry matter). Nanofiltration provides demineralization and concentration as high as 18–20%. Reverse osmosis concentrates whey to a mass fraction of 18–20%. Ion-exchange chromatography complements these methods in the pharmaceutical industry by protein fractionation. During electrochemical processing, electric current passes through whey located between electrodes, which are separated by an ion-permeable membrane. This type of processing creates a concentration of anions and cations that corresponds to the isoelectric point of protein coagulation. Enzymatic hydrolysis opens up new opportunities for obtaining bioactive peptides with reliable antioxidant, antimicrobial, and hypotensive properties. Each of the abovementioned methods has certain limitations. For instance, membrane processes require careful preliminary preparation and are associated with such phenomenon as concentration polarization. Thermal methods are energy intensive while enzymatic methods depend on the activity and stability of enzyme preparations. By combining these methods, dairy producers achieve deep processing and perform selective isolation of target fractions. Advanced whey processing technologies provide new sustainable opportunities, promoting the dairy industry to the stage of circular economy.

Keywords: whey, processing methods, membrane technologies, centrifugation, demineralization, enzymatic hydrolysis

Список литературы

1. Гаврилов, Г. Б. Пути рационального использования молочной сыворотки / Г. Б. Гаврилов, Э. Ф. Кравченко // Сыроделие и маслоделие. 2013. № 2. С. 10–13. <https://elibrary.ru/pwwmot>
2. Jelen, P. Whey-based functional beverages / P. Jelen // Functional and speciality beverage technology. Ed. by P. Paquin – Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. – P. 259–280.
3. Гаврилов, Г. Б. Мембранные процессы для переработки молока и сыворотки / Г. Б. Гаврилов, Э. Ф. Кравченко, В. Г. Гаврилов // Сыроделие и маслоделие. 2013. № 6. С. 22–23. <https://elibrary.ru/rpvxh>
4. Baldasso, C. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration / C. Baldasso, T. C. Barros, I. C. Tessaro // Desalination. 2011. Vol. 278(1–3). P. 381–386. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.055>

5. Евдокимов, И. А. Развитие мембранных технологий: рациональность и безотходность / И. А. Евдокимов // Молочная промышленность. 2010. № 12. С. 60–65. <https://elibrary.ru/nceazz>
6. Храмов, А. Г. Использование микрофльтрации для биологической стабилизации молочной сыворотки / А. Г. Храмов, Е. Р. Абдулина, И. А. Евдокимов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1997. № 1. С. 37–39.
7. Pouliot, Y. Membrane processes in dairy technology - From a simple idea to worldwide panacea / Y. Pouliot // International Dairy Journal. 2008. Vol. 18(7). P. 735–740. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.005>
8. Mulder, M. Basic principles of membrane technology / M. Mulder. - Dordrecht: Springer, 2012. - 564 p.
9. Zydney, A. L. Protein separations using membrane filtration: new opportunities for whey fractionation / A. L. Zydney // International Dairy Journal. 1998. Vol. 8(3). P. 243–250. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(98\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(98)00045-4)
10. Храмов, А. Г. Что еще почитать о сыворотке / А. Г. Храмов // Молочная промышленность. 2015. № 12. С. 49–50. <https://elibrary.ru/svppws>
11. Peinemann, K. V. Membranes for food applications / K. V. Peinemann, S. P. Nunes, L. Giorno. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. - 264 p.
12. Menchik, P. Nonthermal concentration of liquid foods by a combination of reverse osmosis and forward osmosis. Acid whey: A case study / P. Menchik, C. I. Moraru // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 253(6). P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.015>
13. Fenton-May, R. I. Use of ultrafiltration/reverse osmosis systems for the concentration and fractionation of whey / R. I. Fenton-May, C. G. Hill Jr, C. H. Amundson // Journal of Food Science. 1971. Vol. 36(1). P. 14–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1971.tb02021.x>
14. Chen, G. Q. A pilot scale study on the concentration of milk and whey by forward osmosis / G. Q. Chen [et al.] // Separation and Purification Technology. 2019. Vol. 215. P. 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.050>
15. Паладий И. В. Молочная сыворотка: обзор работ. Часть 2. Процессы и методы обработки / И. В. Паладий и др. // Электронная обработка материалов. 2021. Т. 57, № 3. С. 83–101. <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.3.83>
16. Беспалова, Е. В. Пути переработки молочной сыворотки, полученной при изготовлении сыров с красителями и пищевкусовыми добавками / Е. В. Беспалова, О. Л. Сороко, Э. А. Бареко // Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2021. № 16. С. 81–88. <https://doi.org/10.47612/2220-8755-2021-16-81-88>
17. Argenta, A. B. Membrane separation processes applied to whey: A review / A. B. Argenta, A. D. P. Scheer // Food Reviews International. 2020. Vol. 36(5). P. 499–528. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1649694>
18. Sathya, R. Recent Trends in Membrane Processing of Whey / R. Sathya [et al.] // Whey Valorization: Innovations, Technological Advancements and Sustainable Exploitation. Ed. by A. Poonia, A. T. Petkoska. - Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. - P. 323–353. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_16
19. Buchanan, D. Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives / D. Buchanan [et al.] // International Journal of Dairy Technology. 2023. Vol. 76(2). 291. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>
20. Дымар, О. В. Определение оптимальных параметров процесса ферментативного гидролиза лактозы в молочной сыворотке / О. В. Дымар, Л. Н. Емельянова, Г. С. Джумок // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2012. № 1. С. 24–30. <https://elibrary.ru/oeaoso>
21. Лодыгин, А. Д. Теория и практика направленного синтеза олигосахаридов в молочном лактозосодержащем сыре / А. Д. Лодыгин, И. А. Евдокимов // Труды БГУ. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы безопасной биосистемы. 2014. Т. 9, № 2. С. 173–180.
22. Xavier, J. R. β -galactosidase: Biotechnological applications in food processing / J. R. Xavier, K. V. Ramana, R. K. Sharma // Journal of Food Biochemistry. 2018. Vol. 42(5). e12564. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12564>
23. Hill, A. R. Precipitation and recovery of whey proteins: A review / A. R. Hill, D. M. Irvine, D. H. Bullock // Canadian Institute of Food Science and Technology Journal. 1982. Vol. 15(3). P. 155–160. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(82\)72529-5](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(82)72529-5)
24. Yadav, J. S. S. Cheese whey: a potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides / J. S. S. Yadav [et al.] // Biotechnology Advances. 2015. Vol. 33(6). P. 756–774. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.07.002>
25. Мироненко, И. М. Особенности переработки сывороточных белков молока / И. М. Мироненко, Е. В. Чорей // Сыроделие и маслоделие. 2009. № 2. С. 40–41. <https://elibrary.ru/kzqvmz>
26. Smithers, G. W. Whey and whey proteins—From 'gutter-to-gold' / G. W. Smithers // International Dairy Journal. 2008. Vol. 18(7). P. 695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>
27. Залашко, М. В. Биотехнология переработки молочной сыворотки / М. В. Залашко. - М.: Агропромиздат, 1990. - 122 с.
28. Olano, A. Lactulose as a food ingredient / A. Olano, N. Corzo // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2009. Vol. 89(12). P. 1987–1990. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3694>
29. Vera, C. Trends in lactose-derived bioactives: Synthesis and purification / C. Vera, C. Guerrero, A. Illanes // Systems Microbiology and Biomanufacturing. 2022. Vol. 2(3). P. 393–412. <https://doi.org/10.1007/s43393-021-00068-2>
30. Храмов, А. Г. Инновационные технологии оптимизированных по биологической ценности пищевых продуктов нового поколения на основе молочной сыворотки / А. Г. Храмов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2018. № 4. С. 30–32. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2018.4.7>; <https://elibrary.ru/uuylyr>
31. Jameson, J. K. Biochemical characterization of two cellobiose 2-epimerases and application for efficient production of lactulose and epilactose / J. K. Jameson [et al.] // Current Research in Biotechnology. 2021. Vol. 3. P. 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.003>
32. Рябцева, С. А. Физиологические эффекты, механизмы действия и применение лактулозы / С. А. Рябцева [и др.] // Вопросы питания. 2020. Т. 89, № 2. С. 5–20. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10012>; <https://elibrary.ru/tnxhwm>
33. Panesar, P. S. Biotechnological approaches for the value addition of whey / P. S. Panesar, J. F. Kennedy // Critical Reviews in Biotechnology. 2012. Vol. 32(4). P. 327–348. <https://doi.org/10.3109/07388551.2011.640624>