

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ | TECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS

Современная наука и инновации. 2026. № 2. С. 80-98
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ
ПРОДУКТОВ

Modern Science and Innovations. 2026;(2):80-98
TECHNICAL SCIENCE
FOOD TECHNOLOGY
PRODUCTS

Научная статья
УДК 664.834

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.7>



Современные тенденции использования продуктов глубокого фракционирования молочного сырья в технологии функционального питания

Софья Игоревна Фурсова¹, Алексей Дмитриевич Лодыгин^{2*}, Иван Алексеевич Евдокимов³

^{1,2,3} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Россия)

¹ fursonya@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-6104-9555>

² allodygin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8460-2954>

³ ievdokimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5396-1548>

*Автор, ответственный за переписку

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы использования вторичного сырья, в частности ретентатов, пермеатов, молочной сыворотки и сухого молока, для создания функциональных продуктов, в том числе безлактозных; представлен состав концентратов, динамика производства и потенциал применения в различных областях. Установлено, что ретентат является богатым источником компонентов, включая фосфолипиды, сывороточные белки и другие компоненты, обладающие высокой биологической активностью, в связи с чем являются перспективным сырьём для создания функциональных продуктов. Актуальность темы обусловлена ростом спроса на полезную пищу и продукты с улучшенными свойствами.

Ключевые слова: вторичное молочное сырьё, функциональные продукты, ретентат, сывороточные концентраты, сухое молоко

Для цитирования: Фурсова С. И., Лодыгин А. Д., Евдокимов И. А. Современные тенденции использования продуктов глубокого фракционирования молочного сырья в технологии функционального питания // Современная наука и инновации. 2026. № 2. С. 80–98. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.7>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025;
одобрена после рецензирования 21.05.2026;
принята к публикации 21.06.2026.

Research article

Modern trends in the use products of deep fractionation of dairy raw materials in functional nutrition technology

Sofia I. Fursova¹, Aleksei D. Lodygin^{2*}, Ivan A. Evdokimov³

^{1,2,3} North Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russia)

¹ fursonya@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-6104-9555>

² allodygin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8460-2954>

³ ievdokimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5396-1548>

*Corresponding author

© Фурсова С. И., Лодыгин А. Д., Евдокимов И. А., 2026

Abstract. This article examines the potential for using secondary raw materials, specifically retentates, permeates, whey, and milk powder, to create functional products, including lactose-free ones. It presents the composition of the concentrates, production trends, and potential applications in various fields. It has been established that retentate is a rich source of components, including phospholipids, whey proteins, and other components with important biological activity, making it a promising raw material for creating functional products. The relevance of this topic is driven by the growing demand for healthy foods and products with improved properties.

Keywords: recycled dairy raw materials, functional products, retentate, whey concentrates, powdered milk

For citation: Fursova SI, Lodygin AD, Evdokimov IA. Modern trends in the use products of deep fractionation of dairy raw materials in functional nutrition technology. *Modern Science and Innovations*. 2026;(2):80-98. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.7>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.12.2025;

approved after reviewing 21.05.2026;

accepted for publication 21.06.2026.

Введение. Современные направления развития пищевой индустрии и растущее стремление людей к поддержанию здоровья способствовали увеличению спроса на полезные продукты питания. Это, в свою очередь, стимулировало создание новых видов продукции с функциональными добавками, такими как продукты с повышенным содержанием белка, пробиотических и пребиотических микроорганизмов, а также продукты с пониженным содержанием лактозы [32]. Одной из задач стратегии развития рынка натуральных функциональных продуктов питания является создание нового поколения полезных продуктов, предназначенных для восполнения недостатка в питании населения Российской Федерации необходимыми нутриентами [45].

Интерес потребителей обусловлен преимуществами такого питания, которое способствует улучшению общего состояния организма и обеспечивает необходимые для здоровья компоненты. Диеты, включающие ферментированные молочные продукты с пробиотиками и пребиотиками, способствуют формированию здоровой кишечной микрофлоры, укрепляет защитные силы организма, повышает его устойчивость к стрессовым факторам и снижает риск развития некоторых кишечных заболеваний [3].

В то же время, с каждым годом увеличивается популярность безлактозных молочных продуктов, что связано с ростом числа людей, сталкивающихся с проблемами пищеварения из-за непереносимости лактозы. Сывороточные белки известны высокой питательной ценностью и широко используются в различных диетических и спортивных рационах. Продукты с сывороточным белком хорошо известны в качестве заменителя яичных белков в кондитерских и хлебобулочных изделиях, в спортивном питании (коктейли, батончики), в диетическом питании. Также сывороточные белки используются в качестве функциональных ингредиентов и заменителей молока в молочных, кисломолочных продуктах, таких как мороженое, сыры, напитки, йогурты, соусы. Подобное часто происходит из-за активной конкуренции на рынке, где также доступны продукты с функциональными растительными белками [1].

1. Перспективное сырьё для производства функциональных продуктов. Молоко является важным источником макроэлементов, таких как: калий, кальций, витамины, а также жир, белки, лактоза и других важных микроэлементов, включая минералы. Некоторые из этих компонентов являются молочными белковыми ингредиентами – мицеллярный казеин и молочный сывороточный белок, выделенные из обезжиренного молока с использованием методов микрофльтрации. Эти ингредиенты привлекают значительное внимание производителей продуктов питания и напитков из-за уникального аминокислотного профиля белков и их функциональных возможностей [21].

1.1. Сухое молоко. Наиболее распространёнными разновидностями сухого молока считаются цельное и обезжиренное. Цельное сухое молоко — это продукт, полученный

путём выпаривания и последующей сушки пастеризованного молока, что позволяет сохранить его основные свойства и обеспечить длительный срок хранения.

Сухое молоко представляет собой не что иное, как выпаренное и высушенное пастеризованное цельное коровье молоко. Согласно современным нормативным требованиям, массовая доля жира в цельном сухом молоке может варьироваться в более широком диапазоне: для продуктов высшего качества этот показатель составляет не менее 26%, а в зависимости от категории продукта может достигать 42% [2]. На рынке также присутствуют молокосодержащие продукты с добавлением растительных жиров, чаще всего пальмового или кокосового масла. Такая замена не только снижает себестоимость, но и позволяет сбалансировать жирнокислотный состав, снижая содержание насыщенных жиров и обогащая продукт полиненасыщенными жирными кислотами, что соответствует современным рекомендациям по здоровому питанию [5].

Самым популярным продуктом в этой группе является сухое обезжиренное молоко. Оно производится путем выпаривания и сушки пастеризованного обезжиренного молока. Согласно ГОСТ 33629-2015, массовая доля жира в таком продукте составляет не более 1,5%, а содержание белка — не менее 34%. Традиционный процесс производства сухого молока начинается с сырого молока, полученного на молочном заводе, дальше оно пастеризуется, разделяется на обезжиренное молоко и сливки с помощью центробежного сепаратора. При производстве цельного молока часть сливок добавляют обратно в обезжиренное молоко для получения молока со стандартным содержанием жира (обычно 26-30% жира в порошке). Излишки сливок используются для приготовления сливочного масла или безводного молочного жира [10].

Следующим этапом процесса является «предварительный нагрев», во время которого нормализованное молоко нагревается до температуры от 75 до 120 °С. Молоко выдерживается в таком состоянии в течение определенного времени – от нескольких секунд до нескольких минут (пастеризация при 72°С в течение 15 секунд). Предварительный нагрев приводит к контролируемой денатурации сывороточных белков в молоке, уничтожает бактерии и инактивирует ферменты. Точный режим выдержки зависит от типа продукта и его предполагаемого конечного использования [44]. Высокий уровень предварительного нагрева увеличивает срок хранения продукта, но снижает растворимость [7].

В современной промышленности для продуктов детского питания строго контролируется концентрация неденатурированного сывороточного белка, которая должна быть не ниже 4,5 мг/г продукта, что гарантирует безопасность и высокое качество конечного сырья [2]. Предварительный нагрев может быть непрямым (с помощью теплообменников) или прямым (путем подачи пара), а также их сочетанием. Нагреватели косвенного нагрева обычно используют отходящее тепло от других частей технологического процесса, чтобы снизить затраты на электроэнергию.

Следующая стадия — выпаривание, в результате которого увеличивается общее содержание сухих веществ (с 9% в обезжиренном молоке до 45–52% в концентрате) [4]. Выпаривание молока осуществляется в вакууме, чтобы свести к минимуму негативное воздействие тепла на термочувствительные компоненты молока, такие как жиры, а также избежать термического разложения важнейших питательных веществ, например, витаминов.

В молочной промышленности используются различные типы выпарных аппаратов, такие как выпарные аппараты с падающей пленкой, пластинчатые и горизонтально-трубчатые выпарные аппараты. Выпарные аппараты с падающей пленкой наиболее широко используются для производства сухого молока и применяются как с термической, так и с механической рекомпрессией пара [44]. Научно обосновано, что использование многостадийной дегидратации (сочетание вакуум-выпаривания и распылительной сушки) позволяет снизить удельное энергопотребление в 4–7 раз по сравнению с одностадийной сушкой [8]. Этот пар, который может быть подвергнут механическому или термическому сжатию, затем используется для подогрева молока в следующем режиме испарителя,

который может работать при более низком давлении и температуре, чем предыдущий. Современные установки могут иметь до семи режимов для достижения максимальной энергоэффективности [36].

Более 85% воды, содержащейся в молоке, может быть удалено в процессе работы вакуумно-выпарной установки. Эффективность вакуум-выпарки настолько высока, что удельные затраты энергии на удаление влаги на этом этапе (2500–2900 кДж/кг) значительно ниже, чем во время сушки [8].

Распылительная сушка представляет собой получение сухого молочного концентрата путём распыления в камере с горячим воздухом. Процесс происходит в большой сушильной камере в потоке горячего воздуха (до 200°C) с помощью вращающегося дискового распылителя или ряда форсунок высокого давления. Капли молока охлаждаются за счет испарения и никогда не достигают температуры воздуха, что позволяет сохранить ценные свойства продукта. Для повышения растворимости и улучшения технологических свойств современные линии оснащаются системами агломерации — слипания мелких частиц в более крупные пористые агрегаты непосредственно в процессе сушки [7].

Большая часть оставшейся воды испаряется в сушильной камере, в результате чего получается мелкий порошок. Окончательная или «вторичная» сушка происходит в псевдоожиженном слое (кипящем слое) или в серии таких слоев, в которых горячий воздух продувается через слой псевдоожиженного порошка. Этап досушивания в псевдоожиженном слое позволяет снизить влажность до стабильных 2-4% и придать частицам растворимость, соответствующую высшему сорту (индекс растворимости не более 0,1 см³ сырого осадка для цельного молока) [2, 14]. В зависимости от класса оборудования, процесс может включать встроенный в башню псевдоожиженный слой, внешний вибропсевдоожиженный слой для досушивания и зону охлаждения, что обеспечивает минимальное тепловое воздействие на продукт [3].

Для производства продуктов специального назначения (например, для длительного хранения или космического питания) всё чаще применяется альтернативный метод — сублимационная сушка. Этот метод позволяет избежать высокотемпературного воздействия, характерного для распылительной сушки, и обеспечивает максимальную сохранность биологически активных компонентов и высокую стойкость к окислению при хранении [5, 9]. Сухое молоко легко впитывает влагу из воздуха, что приводит к быстрой потере качества и слеживанию или комкованию, для сохранения его качества и срока годности необходима защита от влаги, кислорода, света и тепла. Жир сухого молока может вступать в реакцию с кислородом воздуха, придавая ему неприятный привкус, особенно при более высоких температурах хранения (> 30 °C).

Сухое молоко упаковывается либо в многослойные пакеты с пластиковой подкладкой (25 кг), либо в контейнеры для сыпучих продуктов (600 кг) [29].

К наиболее известным мировым производителям молочных продуктов, включая сухое молоко, являются швейцарская компания Nestlé, французская Danone, Lactalis, голландская Friesland Campina и новозеландская Fonterra. Польша входит в число ведущих производителей сухого обезжиренного молока в Евросоюзе. В производстве этого продукта участвуют компании: Mlekovita, Mlekpól, Polmlek Group и Zott Polska. Одним из ведущих дистрибьюторов в Польше является компания Foodcom S.A., в каталог продукции которой входят: сухое и обезжиренное молоко, а также другие высококачественные молочные продукты [2].

1.2. Сывороточные белки. Молочная сыворотка содержит более 50% от общего количества питательных веществ в молоке. Сыворотка имеет высокую органическую нагрузку, и она может стать загрязнителем окружающей среды, если она будет удалена непосредственно в качестве сточных вод [11]. Чтобы уменьшить экологические опасности, связанные с утилизацией сыворотки, а также повысить экономическую ценность молочных продуктов, молочная промышленность превратила сыворотку в ряд ингредиентов с

добавленной стоимостью, которые используются в пищевой и других отраслях промышленности для их питательных и функциональных атрибутов [10]. Для этого в технологии кисломолочных продуктов широко используются жидкие и сухие концентраты сывороточных белков [46].

С этой целью пищевая и химическая промышленность перерабатывают почти 50% остаточной сыворотки для производства продуктов с добавленной стоимостью. Например, сухой сывороточный порошок обычно производится из сывороточных потоков, которые затем могут быть использованы в качестве пищевого ингредиента, например, в качестве усилителя вкуса, модификатора текстуры или усилителя питательных веществ [26].

Тем не менее, сывороточный порошок не является единственным продуктом с добавленной стоимостью потока сыворотки. В последние годы молочная промышленность применяла различные технологии для переработки сыворотки и производства большого количества продуктов, таких как подслащенная сгущенная сыворотка, концентрат сывороточного белка, изолят сывороточного белка, сывороточная лактоза, ферментированные или неферментированные напитки на основе сыворотки и биоэтанол [10].

Напитки на основе сыворотки привлекли большое внимание благодаря их подлинному и освежающему вкусу, включают в себя простые, газированные, алкогольные, фруктовые и ферментированные напитки [37]. Кроме того, сывороточный пермеат имеет также некоторые потенциальные применения в различных областях. Из-за высокого содержания лактозы в сывороточном пермеате, он, как правило, дополнительно обрабатывается для получения лактозы в очищенной форме.

Одними из последних применений пермеата является использование в качестве материала для микрокапсуляции пробиотических микроорганизмов [19], использование в качестве источника для производства спортивных напитков на основе сыворотки и добавление в производство жидких удобрений [42]. Кроме того, также сообщалось об использовании сыворотки в качестве сырья для производства биомассы микроводорослей и производства этанола дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* [10].

1.3. Сывороточные фильтраты и концентраты. Мембранная технология играет жизненно важную роль в обработке молочных продуктов, в основном в фракционировании и разделении молочного белка для получения концентратов. При производстве молочного белкового концентрата с 80% белка обезжиренное молоко (МБК 80) подвергается ультрафильтрации и диафильтрации. Образуется жидкий концентрат, который частично делактозирован и имеет в составе много белка. Такой концентрат используют для получения порошка МБК 80. Во время ультрафильтрации вода, лактоза и некоторые растворимые соли проходят через мембрану и собираются в пермеат. Составы с высоким молекулярным весом, такие как казеины, сывороточные белки и некоторые минералы, сосредоточены в потоке удержания. Диафильтрация — это процесс добавления воды в продукт во время ультрафильтрации с последующим удалением лактозы и растворимых солей для увеличения относительной концентрации белка [39].

Сухие вещества молока содержат 80% лактозы, 3% белка, 8,5% золы и некоторое количество жира. В виде порошка микропартикулят может использоваться для замены молочных твердых веществ в пищевых составах, в то время как в жидкой форме он в основном используется для стандартизации содержания белка, как правило, в концентрированном формате при 20-25% общих твердых веществ.

Жидкий концентрат имеет сложный химический состав и содержит значительное количество кальция (Ca) и неорганического фосфата (iPi) [34]. Ретентат микрофильтрации исследуется на предмет его универсальности в пищевой промышленности, выступая в качестве улучшителя выпечки, шоколадной добавки, усилителя для смачивания для мгновенных продуктов и стабилизатора маргарина. Исследования показали его потенциал в качестве замены традиционных молочных продуктов, эмульгаторов и яиц в таких продуктах, как мороженое, суп и кондитерские изделия. Например, ранее было обнаружено, что

мороженое, изготовленное из концентрата, обладает сопоставимыми сенсорными характеристиками и лучшими физическими свойствами, чем те, которые сделаны из обезжиренного сушеного молока. Аналогичным образом, концентраты продемонстрировали эффективность как естественного эмульгатора в мороженом, карамели и торте, подчеркивая его функциональную универсальность.

Потенциал пермеатов и ретентатов в разработке продукта является значительным, особенно в функциональных продуктах питания и пищевых добавках. Ретентаты могут быть полезны потребителям, заботящимся о своем здоровье, осознавшим преимущества здорового питания. Высокое содержание белка и биоактивные компоненты делают концентраты отличным ингредиентом для создания пищевых добавок, ориентированных на различные демографические группы, такие как спортсмены, пожилые люди и люди с особыми диетическими потребностями. В молочной промышленности концентраты дают перспективы для инноваций в производстве сыра, йогуртовых продуктов и детских смесей [33].

1.4. Пробиотики. Кисломолочные продукты – это продукты, широко потребляемые во всем мире, показавшие в последнее годы значительное увеличение потребительского спроса благодаря питательным и оздоровительным преимуществам, а также положительному влиянию на бактериальную микробиоту кишечника. Процесс ферментации увеличивает биодоступность питательных веществ продукта, улучшает действие специфических штаммов молочнокислых бактерий, что может привести к удалению токсичных или антипитательных факторов из сквашенного молока для предотвращения непереносимости лактозы и накопления галактозы [2].

В дополнение к производству молочной кислоты, производство других соединений зависит от бактериальных штаммов, условий процесса ферментации и среды ферментации. Наиболее распространенными штаммами молочнокислых микроорганизмов, используемыми для ферментации молока, являются: *Streptococcus thermophilus*, обычно в сочетании с *Bifidobacteria*, такими как *Bifidobacterium breve* C50, *Bifidobacterium lactis*, *Bifidobacterium longum* и *Bifidobacterium animalis*, или с *Lactobacillus*, такими как *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei*. Лактобактерии обладают специфичностью и производят определенные продукты в ходе ферментации.

Среди других преимуществ для здоровья, пробиотики повышают иммунитет, уменьшают воспаление, облегчают желудочно-кишечные боли и предотвращают диарею. Они работают с различными механизмами, производят антимикробные вещества, такие как органические кислоты или бактериоцины, контролируют иммунный ответ, выделяя иммунный глобулин против потенциальных патогенов, снижают риск развития аллергии, усиливают функцию слизистого барьера кишечника, повышают стабильность или способствуют восстановлению комменсальной микрофлоры при ее нарушении, модулируют экспрессию генов хозяина и высвобождают функциональные белки.

Чаще всего молочные продукты, продаваемые в магазинах, сквашены молочнокислыми бактериями, широко использующимися в качестве пробиотиков. Самыми употребляемыми в пищу продуктами этой категории являются йогурты, кефир и кисломолочные напитки [15]. При потреблении в достаточном количестве пробиотиков, содержащиеся там живые бактерии предлагают преимущества, такие как способность улучшить общее здоровье организма.

Каждый из нескольких родов, видов и штаммов, в которые используются в пищевой промышленности, обладает уникальными качествами и преимуществами для здоровья. Природных источников этих бактерий предостаточно: ферментированные продукты, напитки и коммерчески продаваемые пробиотические добавки. Пробиотическая таксономия, их естественные источники и несколько форм пробиотических добавок тщательно обсуждаются, в частности, их род, виды и штаммы, создавая классификацию пробиотиков. Наиболее часто встречающиеся формы пробиотиков, их классификации и связанные с ними преимущества для здоровья описаны в таблице 1.

Таблица 1. Классификация пробиотиков /
Table 1. Classification of Probiotics

Род	Виды	Штамм
<i>Lactobacillus</i>	<i>L. acidophilus</i>	LA-5
<i>Lactobacillus</i>	<i>L. rhamnosus</i>	GG
<i>Bifidobacterium</i>	<i>B. bifidum</i>	BB-12
<i>Bifidobacterium</i>	<i>B. longum</i>	BL-05
<i>Saccharomyces</i>	<i>S. boulardii</i>	CNCM I-745

Пробиотики изобилуют многими ферментируемыми продуктами и напитками. Эти продукты обеспечивают полезные бактерии и другие питательные вещества, улучшающие общее состояние здоровья. В таблице 2 перечислены природные источники пробиотиков вместе с их микробным составом и связанными с ним преимуществами для здоровья [20].

Таблица 2. Естественные источники пробиотиков /
Table 2. Natural Sources of Probiotics

Продукт	Микробное содержание	Польза для здоровья
Yoghurt	<i>L. acidophilus</i> , <i>B. bifidum</i>	Улучшает работу кишечника, улучшает усвоение кальция
Kefir	<i>L. kefir</i> , <i>S. cerevisiae</i>	Поддерживает иммунную систему, снижает уровень холестерина
Kimchi	<i>L. plantarum</i> , <i>L. brevis</i>	Способствует здоровью кишечника, содержит антиоксиданты
Kombucha	<i>S. cerevisiae</i> , <i>L. spp.</i>	Выводит токсины из организма, улучшает микрофлору кишечника

1.5. Пребиотики. Микробиота кишечника состоит из разнообразного сообщества микроорганизмов, обнаруженных в организме человека, и имеет жизненно важное значение для функционирования иммунной системы, пищеварения, метаболизма и общего состояния здоровья. Пребиотики являются диетическим компонентом, который привлекает большое внимание из-за своего потенциала в качестве стимуляции роста полезных бактерий и улучшению общего состояния здоровья кишечника [13].

Пребиотики описываются как отдельный компонент ферментации, который изменяет активность или состав микробиоты кишечника в пользу организма-хозяина. Пребиотики должны быть в состоянии противостоять желудочным кислотам, расщепляясь при этом пищеварительными ферментами, усваиваться верхними желудочно-кишечными трактами, ферментироваться кишечной микробиотой, и поощрять рост или активацию полезных видов кишечной микробиоты.

Пребиотики оказывают влияние на те типы бактерий, которые уже присутствуют в толстой кишке и в первую очередь нацелены на виды лактобацилл и бифидобактерий. Их действие выражается в увеличении производства короткоцепочечных жирных кислот и снижении pH среды. Потребление пищевых волокон имеет решающее значение для сохранения функциональности слизистого барьера в кишечнике.

Слово «пребиотик» относится к широкому спектру веществ, каждое из которых имеет различные структуры и способы действия. Пребиотики бывают разных форм, от резистентных крахмалов до олигосахаридов, и недавно исследования смогли их идентифицировать и охарактеризовать. Каждый вид пребиотика обладает уникальными качествами и преимуществами для здоровья [36]. Эти пребиотические вещества способны противостоять пищеварению в верхнем желудочно-кишечном тракте и добираться до толстой кишки, где действуют как субстраты для ферментации полезными кишечными бактериями, например, инулин, олигофруктоза, галактофруктоза, галакто-олигосахариды и ксило-олигосахариды, не являющиеся усваиваемыми углеводами, как показано на рисунке 1 [28].



Рисунок 1. Типы пребиотиков /
Figure 1. Types of Prebiotics

2. Молочный ретенат как основа функциональных продуктов. Традиционно сыворотка определялась как побочный продукт сыроварения и исторически рассматривалась производителями сыра как отходы, имеющие небольшую или нулевую коммерческую ценность. Ее накопление представляло собой серьезную экологическую проблему из-за высокого содержания органических веществ и высокой биохимической потребности в кислороде.

Следовательно, сектору переработки молочной продукции не разрешалось утилизировать сыворотку традиционными способами, что требовало дополнительных этапов обработки для снижения уровня загрязнения, что, в свою очередь, увеличивало производственные затраты.

Однако достижения в научных исследованиях и технологиях, в сочетании с экологическими соображениями и растущим спросом на натуральные, экологически чистые продукты, побудили исследователей и молочный сектор пересмотреть оценку сыворотки как ценного ресурса. Сегодня сыворотка все чаще рассматривается как источник ценных ингредиентов с многофункциональными преимуществами [33].

В классическом процессе производства концентрата молочного белка (КМБ) обезжиренное молоко подвергается ультрафильтрации с использованием спирально-навитой мембраны для получения КМБ80 с содержанием сухих веществ около 20% и белка 80% в пересчете на сухое вещество. Однако повышение эффективности производства за счет увеличения содержания сухих веществ в ретенате.

Некоторые предприятия молочной и пищевой промышленности используют ультрафильтрацию (УФ) в системах мембранной фильтрации (МФ) для обработки высоковязких продуктов. Однако эта система нашла ограниченное применение в концентрировании молочного белка (КМБ). При увеличении содержания твердых веществ вязкость КМБ 80 также возрастает, что является серьезным препятствием в процессе мембранной фильтрации [23].

Микрофильтрационный ретенат перспективен для улучшения питания младенцев путем дополнения детских смесей. Исследования показали, что у младенцев, получающих детские смеси в качестве еды, наблюдается снижение нейро- и когнитивного развития, а также повышенный риск атопических заболеваний, респираторных инфекций, некротизирующего энтероколита и желудочно-кишечных осложнений по сравнению с младенцами, находящимися на грудном вскармливании. Это различие в значительной

степени объясняется недостаточным содержанием в детских смесях важных питательных веществ, таких как фосфолипиды и белки.

Также замечен потенциал концентратов в питании пожилых людей, поскольку исследования показывают, что мембрана жировых шариков молока может поддерживать когнитивное здоровье и физическую работоспособность, особенно в сочетании с регулярными физическими упражнениями. Пожилые люди часто стремятся оставаться активными, поддерживать уровень энергии и сохранять умственную активность.

Мембраны жировых шариков молока благотворно влияют на здоровье кишечника, улучшают состояние кожи и помогают контролировать такие состояния, как гиперхолестеринемия, ожирение и воспаление. В недавнем исследовании на мышах сочетание добавок микрофилтратов и регулярных физических упражнений эффективно предотвратило возрастное снижение мышечной массы и силы [27]. Более того, люди с хроническими воспалительными заболеваниями желудочно-кишечного тракта могут получить пользу от данных пищевых продуктов, так как они снижают аутоиммунные реакции, тем самым облегчая локальное воспаление.

Перспективным направлением использования компонентов микрофилтрационного ретентата является разработка функциональных продуктов питания, предназначенных для обеспечения целенаправленной пользы для здоровья, такой как улучшение работы кишечника, повышение иммунных и когнитивных функций. Продукты питания с функциональными свойствами могут устранять конкретные дефициты питательных веществ и проблемы со здоровьем, используя биоактивные компоненты микрофилтрационного ретентата для достижения максимальной пользы.

Кроме того, значительный потенциал представляет выделение специфических биоактивных соединений из микрофилтрационного ретентата для использования в нутрицевтических продуктах. Нутрицевтики, сочетающие в себе свойства питания и фармацевтики, могут способствовать общему здоровью и благополучию. Соединения, полученные из микрофилтрационного ретентата, показали потенциал в снижении воспаления, усилении иммунного ответа и поддержании метаболического здоровья, что открывает значительные возможности для инноваций в этой [5].

Эти биологически активные вещества, присутствующие в обычных продуктах питания, помимо своей питательной ценности, могут приносить значительную пользу для здоровья, представляя собой перспективное направление для дальнейших исследований и разработок в области применения нутрицевтиков [33].

Безлактозные продукты на основе ретентатов. Одной из основных причин ограничения потребления молочных продуктов является непереносимость лактозы. Непереносимость лактозы возникает, когда у человека наблюдается дефицит β -галактозидазы в тонком кишечнике, что может привести к таким негативным симптомам, как тошнота, вздутие живота и боли. Порция жидкого молока объемом 240 мл содержит приблизительно 12 г лактозы, что является проблемой для людей с непереносимостью лактозы. Основным методом лечения людей, страдающих непереносимостью лактозы, является безлактозная диета и употребление продуктов с пониженным содержанием лактозы [5].

Исходное содержание лактозы в коровьем молоке составляет 4,8 г/100 г, но в процессе трехкратной ультрафилтрации оно снижается до 1,6 г/100 г. После завершения диафилтрации содержание лактозы в молоке составляет всего 1,6%. Оставшуюся лактозу можно гидролизовать, получив 100% безлактозное молоко, которое не будет иметь приторно-сладкого вкуса, как это происходит при гидролизе лактозы. Если для удаления практически всей лактозы, растворимых минералов и других низкомолекулярных компонентов провести диафилтрацию с водой, то полученный продукт будет представлять собой основу для молочного напитка (не молоко или ультрафилтрованное молоко) [16].

Дефицит β -галактозидазы можно разделить на два основных типа: первичный, генетически обусловленный, и вторичный, возникающий вследствие заболеваний,

поражающих тонкий кишечник. Первичный дефицит β -галактозидазы включает врожденные случаи, присутствующие с рождения и относительно редкие, а также непереносимость β -галактозидазы, характеризующуюся естественным снижением активности фермента после отлучения от груди.

Напротив, вторичный дефицит β -галактозидазы вызван основными заболеваниями, поражающими тонкий кишечник. Распространенность непереносимости β -галактозидазы во всем мире стимулировала развитие промышленных процессов, направленных на производство безлактозных продуктов. Эти продукты предназначены для потребления людьми с непереносимостью лактозы, обеспечивая их необходимыми питательными веществами, содержащимися в молочных продуктах, без причинения дискомфорта.

Чтобы продукт считался «безлактозным», он должен содержать концентрацию дисахарида глюкозы-галактозы ниже определенного порогового значения. Этот порог установлен для молока на уровне 0,1 г/100 мл, как установлено Европейским управлением по безопасности пищевых продуктов (EFSA) [12]. Удаление лактозы из молочных продуктов может быть осуществлено с помощью методов разделения или гидролиза [9].

Материалы и методы. Методы разделения лактозы. Удаление лактозы из продукта может быть достигнуто с помощью методов разделения, при которых не происходит ферментативных или химических реакций, расщепляющих этот дисахарид; вместо этого он просто изолируется и удаляется. Удаление лактозы может проводиться с помощью таких методов, как кристаллизация, хроматография и мембранное разделение. Полученная таким образом чистая лактоза находит применение в пищевой промышленности в качестве ингредиента для производства различных пищевых продуктов.

Включение лактозы в пищевые продукты обеспечивает ряд уникальных функциональных свойств, такие как низкая сладость, редуцирующие свойства сахара, свойства переноса цвета/ароматизатора, стабилизацию белка, селективную ферментацию или контроль кристаллизации, а также физиологические преимущества, такие как пребиотические функции. Лактоза широко используется в различных пищевых продуктах, таких как сухое молоко, детские смеси, кондитерские изделия, выпечка и в качестве основы для сухих пищевых смесей [41].

Было показано, что гидролиз лактозы на начальном этапе с помощью β -галактозидаз повышает эффективность и селективность мембранных методов разделения при выделении биологически активных олигосахаридов. Почти 100% гидролиз лактозы был достигнут при инкубации β -галактозидазы из *Aspergillus oryzae* в грудном молоке человека при pH 5,2 в течение 4–5 часов. Сочетание селективного осаждения белков, гидролиза лактозы и нанофильтрации (с последующей диафильтрацией) позволило извлечь более 50% олигосахаридов грудного молока человека [24].

Метод кристаллизации. Кристаллизация – это физический процесс, характеризующийся образованием кристаллического твердого вещества в результате охлаждения насыщенного раствора. Лактоза существует в двух аномерных формах, α -лактоза и β -лактоза, благодаря наличию хирального атома углерода. Наиболее распространенной формой является гидратированный кристалл моногидрата α -лактозы, который кристаллизуется при температурах ниже 93,5 °C [17].

В промышленных масштабах кристаллизация лактозы осуществляется в несколько последовательных этапов, включая концентрирование, кристаллизацию и очистку. Первоначально молочные продукты подвергаются процессу выпаривания для удаления воды и концентрирования лактозы. Затем концентрированный раствор переносится в кристаллизационный реактор, где кристаллы лактозы постепенно образуются путем контролируемого охлаждения.

После кристаллизации кристаллы отделяются от раствора с помощью центрифугирования. На заключительном этапе очистки кристаллы снова промываются и центрифугируются для удаления примесей, в результате чего получается желаемый конечный продукт.

Для оптимизации эффективности работы крайне важно поддерживать температуру в определенных диапазонах: от 65°C до 70°C после стадии испарения и от 25°C до 20°C во время процесса кристаллизации [17, 30]. Важно понимать, что белки могут выступать в качестве модификаторов кристаллизации, поскольку оказывают значительное влияние на образование и рост кристаллов, воздействуя на такие факторы, как нуклеация, рост кристаллов и их форма [43]. Хотя точный механизм влияния белков на кристаллизацию лактозы остается неясным, существует теория, что их способность связывать воду создает локализованные области пересыщения лактозой. В качестве альтернативы некоторые исследователи предполагают, что белки могут служить центрами нуклеации, способствуя гетерогенной нуклеации лактозы [18].

В промышленных процессах кристаллизации обычно получают мелкие кристаллы лактозы, тогда как в идеале для облегчения последующего разделения и обработки необходимо получать крупные и однородные кристаллы. Предпочтительно, кристаллы лактозы должны иметь размер от 200 до 300 мкм и форму томагавка [18]. Размер, распределение и форма кристаллов зависят от типа раствора и условий работы. Кроме того, размер и распределение зародышей лактозы существенно влияют на скорость зарождения и роста кристаллов [30].

Поэтому, помимо традиционных методов, на стадии кристаллизации для повышения образования кристаллов можно также использовать процедуры с отрицательной температурой для стимулирования роста кристаллов, ультразвук для сокращения времени индукции зарождения и увеличения скорости кристаллизации или поток газов CO² и N₂ для увеличения скорости зарождения и выхода.

Хотя основной целью этой технологии не обязательно является производство безлактозных продуктов, ее применение для удаления лактозы из молочного сырья может значительно способствовать производству безлактозных молочных продуктов. Понимание того, как различные проценты удаления лактозы влияют на производственный процесс, может пролить свет на масштабы и проблемы, связанные с получением безлактозных продуктов с использованием методов кристаллизации. Например, изучение того, как разные уровни удаления лактозы влияют на конечный вкус, текстуру и общее качество продукта, дает ценные сведения о целесообразности и оптимизации производства безлактозных продуктов [9].

Хроматографические методы. Хроматография – это универсальный метод, используемый для разделения различных компонентов смеси на основе их дифференциального удерживания при прохождении через поддерживающую среду. Этот метод включает в себя различные варианты в зависимости от характеристик стационарной и подвижной фаз, а также взаимодействия между компонентами смеси и этими фазами. Примерами типов хроматографии являются ионообменная хроматография, хроматография с гидрофобным взаимодействием и аффинная хроматография, каждая из которых использует различное взаимодействие между стационарной фазой и соединениями смеси для разделения. Кроме того, эксклюзионная хроматография (или гель-фильтрация) представляет собой еще один вариант, в котором разделение определяется размером соединений [6].

Хроматографические методы не получили широкого распространения для разделения лактозы с целью производства безлактозных продуктов в промышленных масштабах, главным образом, из-за экономических соображений. Однако они находят применение для определения содержания лактозы и других соединений в молочных продуктах. Заметным исключением является применение хроматографии для получения безлактозного молока с использованием хроматографической колонки, состоящей из полианилина, функционализированного глутаровым альдегидом, и лектина. Этот метод позволил удалить 47% лактозы из молока, используя высокую аффинность лектина к этому дисахариду [31].

Методы мембранного разделения. Мембранные технологии основаны на применении давления или электростатических градиентов для обеспечения прохождения компонентов раствора через полупроницаемую пористую мембрану. Компоненты, размер

которых соответствует размеру пор мембраны и которые проходят через нее, называются пермеатом, а те, которые не могут проникнуть через мембрану и задерживаются, называются ретентатом.

В молочной промышленности методы мембранной фильтрации, такие как ультрафильтрация (УФ) и нанофильтрация (НФ), играют ключевую роль в извлечении различных соединений из молочных продуктов, включая белки, аминокислоты и лактозу. Эти методы работают по принципу разделения частиц по их размеру с использованием специализированных мембран. УФ-мембраны с размером пор от 1 до 100 нм облегчают прохождение мелких молекул, таких как лактоза, вода и минералы, задерживая при этом более крупные молекулы, такие как белки и жиры. В отличие от них, НФ-мембраны имеют меньшие поры (1–10 нм), что позволяет задерживать лактозу и молекулы аналогичного размера, пропуская при этом более мелкие молекулы, такие как вода и минералы.

Кроме того, методы электродиализа используют электрически заряженные мембраны для достижения разделения посредством электростатического градиента, предоставляя альтернативный подход [9]. Следовательно, эти методы потенциально позволяют получать продукты с низким содержанием лактозы или безлактозные в качестве побочных продуктов процесса фильтрации.

Правильный выбор мембранных материалов (керамических или полимерных) имеет решающее значение для обеспечения оптимальной эффективности разделения. Полимерные мембраны более широко используются благодаря своей доступности и меньшему энергопотреблению по сравнению с керамическими аналогами. Полимерные мембранные материалы, используемые в производстве, можно разделить на модифицированные природные полимеры, такие как ацетат целлюлозы, синтетические полимеры, включая полисульфоны, политетрафторэтилен, полиамиды, полисульфиды и полипропилены. Мембраны из ацетата целлюлозы, как правило, обладают меньшей термической, химической и биологической стойкостью по сравнению с синтетическими полимерами, которые обеспечивают большую устойчивость к изменяющимся условиям эксплуатации, таким как температура и pH. Напротив, керамические мембраны обладают большей устойчивостью благодаря своим физическим, гидротермическим и химическим свойствам стабильности.

В зависимости от конкретных производственных потребностей или областей применения используются различные материалы, такие как кремний (Si), цирконий (Zr), титан (Ti), оксиды алюминия (Al_2O_3) и карбид кремния (SiC), благодаря их различным характеристикам поверхностного заряда в растворе. Керамические мембраны широко используются в микрофильтрации, ультрафильтрации и нанофильтрации [25].

Методы гидролиза лактозы. Гидролиз лактозы включает химический путь, использующий кислотный гидролиз, и биологический путь, использующий ферментативный гидролиз. Кислотный гидролиз облегчается присутствием неорганических и органических кислот, в то время как ферментативный гидролиз использует биологические катализаторы, такие как ферменты. В дополнение к этим двум подходам появился третий метод, известный как метод мембранного реактора, объединяющий ферментативный гидролиз со стадиями разделения [34].

Кислотный гидролиз лактозы включает расщепление β -(1→4)-глюкозидной связи под действием кислых соединений, таких как HCl, H_2SO_4 , лимонная кислота и H_3PO_4 . В этом процессе pH среды обычно снижается до 1–2, и поддерживается высокая температура (100–150°C). Хотя этот метод обычно используется для сыворотки или продуктов, полученных после ультрафильтрации молока, его агрессивные условия могут привести к деградации белка и образованию нежелательных побочных продуктов [38].

Методы ферментативного гидролиза в основном включают фермент β -галактозидазу, которая, как уже упоминалось, катализирует гидролиз β -(1→4)-глюкозидной связи, присутствующей в галактозидах. Этот тетрамерный белок имеет приблизительную молекулярную массу 464 кДа, которая может варьироваться в зависимости от источника. β -галактозидазу можно извлекать из различных биологических источников, включая бактерии,

грибы, дрожжи и растения. Использование метода для производства безлактозных продуктов может быть осуществлено путем применения фермента в его свободной форме или путем иммобилизации на носителе. Методы ферментативного гидролиза лактозы включают введение фермента в реактор, содержащий молочный продукт, что облегчает производство безлактозного продукта благодаря его каталитическому действию [35].

Результаты и обсуждение. В промышленных масштабах гидролиз лактозы с использованием β -галактозидазы широко применяется для производства безлактозного молока, йогуртов, сыров и мороженого, в двух различных процессах: периодическом и асептическом. В периодическом процессе фермент вводят в сосуд, содержащий сырое или термически обработанное (15 секунд при 65°C) молоко, и выдерживают в течение 24 часов при температуре от 4°C до 8°C для подавления роста микроорганизмов. Затем молоко пастеризуют (этот процесс также инактивирует фермент), гомогенизируют и упаковывают.

В асептическом процессе первым этапом стерилизации молока является ультравысокотемпературная обработка (2 секунды при 142°C), после чего стерильный фермент вводят непосредственно перед упаковкой. Поскольку молоко, обработанное при помощи ультравысокой температуры, часто хранится в карантине около 3 дней при комнатной температуре, этого времени достаточно для полного гидролиза до отправки молока розничному продавцу. Поскольку пастеризованное молоко не проходит карантинный период, асептический процесс не используется для этого типа безлактозного молока [22].

В большинстве методов ферментативного гидролиза лактозы обычно выбирают β -галактозидазу. Однако в качестве альтернативы можно использовать β -глюкозидазу, полученную из *Sulfolobus solfataricus* – одноклеточного термофила, принадлежащего группе Архей. Этот фермент продемонстрировал широкую субстратную специфичность по отношению к различным олигосахаридам, включая олигомеры лактозы и глюкозы, а также высокую термостабильность и термофильность, выдерживая температуры до 80 °C. Кроме того, была замечена устойчивость к протеазам, органическим растворителям и детергентам. Таким образом, эта другая группа ферментов представляет значительный потенциал для промышленного использования благодаря своей замечательной универсальности [40].

Заключение. С течением времени растёт количество научных исследований и осведомленность о ценных компонентах микрофилтрационных фракций, что побуждает молочную промышленность диверсифицировать методы производства концентратов. Этот сдвиг обусловлен повышенным вниманием к здоровому питанию, активному образу жизни и устойчивым экологическим практикам.

В данной статье освещен состав концентратов, рост его производства и значительный потенциал применения в различных областях. Микрофилтрационный ретентат является богатым источником компонентов, включая фосфолипиды, сывороточные белки и другие компоненты, обладающие важной биологической активностью.

Помимо этого, мы видим растущий интерес к производству безлактозных продуктов различными методами, в том числе гидролиза при помощи ферментов. Этот подход позволяет людям с непереносимостью лактозы включать эти необходимые продукты в свой рацион без ущерба для здоровья. Ферментативная иммобилизация выделяется среди других вариантов разделения или гидролиза лактозы благодаря возможности повторного использования фермента в нескольких рабочих циклах, что приводит к снижению затрат в промышленном производстве, обеспечивает стабильность фермента в рабочих условиях и сохраняет каталитическую активность.

Возможности исследования ретентатов и концентратов заключаются в разработке функциональных продуктов питания и нутрицевтиков на их основе, в то же время остаются значительные проблемы в оптимизации методов экстракции и обеспечении безопасности и качества продукции. Понимание микробиологического качества, а также минерального и витаминного профиля концентратов является критически важной областью исследований, требующей внимания.

Список источников

1. Achyut M. Manufacture of high-solids milk protein concentrate retentate using plate-and-frame membrane filtration system at low and high temperatures // Journal of Dairy Science. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030225001444> (дата обращения: 15.03.2026).
2. Alicja K. Powdered milk – how is it made and where is it used // Foodcom. URL: <https://foodcom.pl/en/powdered-milk-how-is-it-made-and-where-is-it-usedpowdered-milk-how-is-it-made-and-where-is-it-used/> (дата обращения: 21.03.2026).
3. Anil P. Whey valorization: current options and future scenario – a critical review // Nutrition & Food Science. URL: <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/abs/pii/S0034665918000514> (дата обращения: 09.03.2026).
4. Asfaw T. M. Microfiltration retentate co-product from whey protein isolate production - Composition, processing, applications and potential for value addition // Trends in Food Science & Technology. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224424004151> (дата обращения: 21.03.2026).
5. Vardhanabhuti B. Low lactose milk products // Encyclopedia of Dairy Sciences. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/referencework/abs/pii/B9780128187661003457?via%3Dihub> (дата обращения: 21.03.2026).
6. Batista K. A., Silva C. N. S., Fernandes P. M., Campos I. T. N., Fernandes K. F. Development of a new bioaffinity stationary phase for lactose removal using a lactose-binding lectin immobilized onto polyaniline // Separation and Purification Technology. 2017. Vol. 185. P. 54–60.
7. Bon J. Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus) // Computers & Chemical Engineering. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135409002932> (дата обращения: 11.03.2026).
8. Camila E. Microencapsulation of Lactobacillus plantarum ATCC 8014 through spray drying and using dairy whey as wall materials // LWT - Food Science and Technology. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643817302712> (дата обращения: 19.03.2026).
9. Carlo A. Scientific Opinion on lactose thresholds in lactose intolerance and galactosaemia // EFSA Journal. 2010. Vol. 8. No. 9. Art. 1777. URL: <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/1777> (дата обращения: 21.03.2026).
10. Ozel B., McClements D. J., Arikan C., Kaner O., Oztop M. H. Challenges in dried whey powder production: Quality problems // Food Research International. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996922007402> (дата обращения: 07.03.2026).
11. Antonino C. Development and quality evaluation of a fermented dessert made from donkey milk fortified with oat flour, wheat germ oil, and pomegranate extract // Applied Food Research. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502224001173> (дата обращения: 09.03.2026).
12. Durham R. J. Modern approaches to lactose production // Dairy-Derived Ingredients. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. P. 103–144.
13. Rezende E. S. V. Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification by prebiotic categories // Nutrition. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0899900721000794> (дата обращения: 10.03.2026).
14. Zandona E. Whey Utilization: Sustainable Uses and Environmental Approach // Food Technology and Biotechnology. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34316276/> (дата обращения: 21.03.2026).
15. Pawade M. M. Fruit based probiotic functional beverages: A review // Journal of Agriculture and Food Research. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323002363> (дата обращения: 21.03.2026).
16. Gajendragadkar C. N., Gogate P. R. Ultrasound assisted acid catalyzed lactose hydrolysis: Understanding into effect of operating parameters and scale up studies // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 37. P. 9–15.
17. Halfwerk R., Yntema D., Van Spronsen J., Van der Padt A. A sub-zero crystallization process for the recovery of lactose // Journal of Food Engineering. 2021. Vol. 308. Art. 110677.
18. Harju M., Kallioinen H., Tossavainen O. Lactose hydrolysis and other conversions in dairy products: Technological aspects // International Dairy Journal. 2012. Vol. 22. No. 2. P. 104–109.
19. Setiawati H. Fermentation of Whey Waste as Organic Liquid Fertilizer "PUCAFU" // Agrotech. URL: <https://www.researchgate.net/publication/331629753> (дата обращения: 21.03.2026).

20. Hernandez A. J. Milk beverage base with lactose removed with ultrafiltration: Effect of fat and protein concentration on sensory and physical properties // *Journal of Dairy Science*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203022300632X> (дата обращения: 07.03.2026).
21. Carter B. G. Invited review: Microfiltration-derived casein and whey proteins from milk // *Journal of Dairy Science*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030221000126> (дата обращения: 11.03.2026).
22. Ionata E., Marcolongo L., La Cara F., Cetrangolo G. P., Febbraio F. Improvement of functional properties of a thermostable β -glycosidase for milk lactose hydrolysis // *Biopolymers*. 2018. Vol. 109. No. 10. Art. e23118.
23. Wit J. N. D. Nutritional and Functional Characteristics of Whey Proteins in Food Products // *Journal of Dairy Science*. 1998. Vol. 81. No. 3. P. 597–608. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030298756139> (дата обращения: 11.03.2026).
24. Jorge L. V. Hydrolysis of Lactose: Conventional Techniques and Enzyme Immobilization Strategies on Polymeric Supports // *Milk Proteins - Technological Innovations, Nutrition, Sustainability and Novel Applications*. IntechOpen, 2023. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1188731> (дата обращения: 21.03.2026).
25. de Moura Bell J. M. L. N. Modeling lactose hydrolysis for efficiency and selectivity: Toward the preservation of sialyloligosaccharides in bovine colostrum whey permeate // *Journal of Dairy Science*. 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216302909> (дата обращения: 09.03.2026).
26. Lamia A. Sustainable whey processing techniques: Innovations in derivative and beverage production // *Food Bioscience*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212429223002936> (дата обращения: 11.03.2026).
27. Alali M. Nutraceuticals: Transformation of conventional foods into health promoters/disease preventers and safety considerations // *Molecules*. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/9/2540> (дата обращения: 10.03.2026).
28. Md R. A. Probiotics and their applications in functional foods: a health perspective // *Applied Food Research*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502225004986> (дата обращения: 21.03.2026).
29. Milk Powder Production // Rotronic Measurement Solutions. URL: https://www.rotronic.com/media/news/files/1466670855_FF-Milk-Powder.pdf (дата обращения: 10.03.2026).
30. Mimouni A. Kinetics of lactose crystallization and crystal size as monitored by refractometry and laser light scattering: Effect of proteins // *Le Lait*. 2005. URL: <http://www.edpsciences.org/10.1051/lait:2005015> (дата обращения: 11.03.2026).
31. Reig M. Use of Membrane Technologies in Dairy Industry: An Overview // *Foods*. 2021. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/11/2768> (дата обращения: 12.03.2026).
32. García-Burgos M. New perspectives in fermented dairy products and their health relevance // *Journal of Functional Foods*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464620302838> (дата обращения: 21.03.2026).
33. Oluwatobi V. O. Unveiling the role of functional foods with emphasis on prebiotics and probiotics in human health: A review // *Journal of Functional Foods*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464624003396> (дата обращения: 11.03.2026).
34. Tsermoula P. Physicochemical properties and stability of milk permeate as influenced by ultrafiltration processing parameters // *International Dairy Journal*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694624001250> (дата обращения: 21.03.2026).
35. Dekker P. J. T. Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits // *Nutrients*. 2019. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/3/551> (дата обращения: 10.03.2026).
36. Ramírez C. A. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry // *Energy*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544205001945> (дата обращения: 07.03.2026).
37. Sugita S. The impact of milk fat globule membrane with exercise on age-related degeneration of neuromuscular junctions // *Nutrients*. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/7/2310> (дата обращения: 10.03.2026).

38. Saqib S., Akram A., Halim S. A., Tassaduq R. Sources of β -galactosidase and its applications in food industry // 3 Biotech. 2017. Vol. 7. No. 1. Art. 79.
39. Thomas C. F. Physicochemical properties of micellar casein retentates generated at different microfiltration temperatures // Journal of Dairy Science. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030223012079> (дата обращения: 10.03.2026).
40. Coolbear T. Heat-induced changes in the sensory properties of milk // International Dairy Journal. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958694621002272> (дата обращения: 21.03.2026).
41. Wong S. Y., Hartel R. W. Crystallization in lactose refining—A review // Journal of Food Science. 2014. Vol. 79. No. 3. P. R257–R272.
42. Han X. Regulation of dietary fiber on intestinal microorganisms and its effects on animal health // Animal Nutrition. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405654523000756> (дата обращения: 10.03.2026).
43. Yanira I. S. Individual and combined effect of pH and whey proteins on lactose crystallization // Food Research International. 2018. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996918306604> (дата обращения: 21.03.2026).
44. Zhang Y. Modelling of a milk powder falling film evaporator for predicting process trends and comparison of energy consumption // Journal of Food Engineering. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877418300281> (дата обращения: 21.03.2026).
45. Автандилян Н. Г., Халкечев Р. Р., Лодыгин А. Д. Формирование требований к составу и физико-химическим показателям лактозосодержащего сырья для производства концентратов лактулозы // Новейшие достижения в области медицины, здравоохранения и здоровьесберегающих технологий. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. С. 14–17. <https://doi.org/10.21603/-I-IC-4>
46. Баранов С. А., Евдокимов И. А., Гордиенко Л. А., Шрамко М. И. Влияние микропартикулята сывороточных белков на показатели кисломолочных напитков // Молочная промышленность. 2020. № 9. С. 59–62.

References

1. Achyut M. Manufacture of high-solids milk protein concentrate retentate using plate-and-frame membrane filtration system at low and high temperatures. Journal of Dairy Science. 2025. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030225001444> [Accessed 15 Mar 2026].
2. Alicja K. Powdered milk – how is it made and where is it used. Foodcom. Available from: <https://foodcom.pl/en/powdered-milk-how-is-it-made-and-where-is-it-usedpowdered-milk-how-is-it-made-and-where-is-it-used/> [Accessed 21 Mar 2026].
3. Anil P. Whey valorization: current options and future scenario – a critical review. Nutrition & Food Science. Available from: <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/abs/pii/S0034665918000514> [Accessed 9 Mar 2026].
4. Asfaw TM. Microfiltration retentate co-product from whey protein isolate production - Composition, processing, applications and potential for value addition. Trends in Food Science & Technology. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224424004151> [Accessed 21 Mar 2026].
5. Vardhanabhuti B. Low lactose milk products. Encyclopedia of Dairy Sciences. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/referencework/abs/pii/B9780128187661003457?via%3Dihub> [Accessed 21 Mar 2026].
6. Batista KA, Silva CNS, Fernandes PM, Campos ITN, Fernandes KF. Development of a new bioaffinity stationary phase for lactose removal using a lactose-binding lectin immobilized onto polyaniline. Separation and Purification Technology. 2017;185:54-60.
7. Bon J. Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus). Computers & Chemical Engineering. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135409002932> [Accessed 11 Mar 2026].
8. Camila E. Microencapsulation of Lactobacillus plantarum ATCC 8014 through spray drying and using dairy whey as wall materials. LWT - Food Science and Technology. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643817302712> [Accessed 19 Mar 2026].
9. Carlo A. Scientific Opinion on lactose thresholds in lactose intolerance and galactosaemia. EFSA Journal. 2010;8(9):1777. Available from: <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/1777> [Accessed 21 Mar 2026].

10. Ozel B, McClements DJ, Arikan C, Kaner O, Oztop MH. Challenges in dried whey powder production: Quality problems. *Food Research International*. 2022. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996922007402> [Accessed 7 Mar 2026].
11. Antonino C. Development and quality evaluation of a fermented dessert made from donkey milk fortified with oat flour, wheat germ oil, and pomegranate extract. *Applied Food Research*. 2024. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502224001173> [Accessed 9 Mar 2026].
12. Durham RJ. Modern approaches to lactose production. In: *Dairy-Derived Ingredients*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. P. 103-144.
13. Rezende ESV. Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification by prebiotic categories. *Nutrition*. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0899900721000794> [Accessed 10 Mar 2026].
14. Zandona E. Whey Utilization: Sustainable Uses and Environmental Approach. *Food Technology and Biotechnology*. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34316276/> [Accessed 21 Mar 2026].
15. Pawade MM. Fruit based probiotic functional beverages: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323002363> [Accessed 21 Mar 2026].
16. Gajendragadkar CN, Gogate PR. Ultrasound assisted acid catalyzed lactose hydrolysis: Understanding into effect of operating parameters and scale up studies. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;37:9-15.
17. Halfwerk R, Yntema D, Van Spronsen J, Van der Padt A. A sub-zero crystallization process for the recovery of lactose. *Journal of Food Engineering*. 2021;308:110677.
18. Harju M, Kallioinen H, Tossavainen O. Lactose hydrolysis and other conversions in dairy products: Technological aspects. *International Dairy Journal*. 2012;22(2):104-109.
19. Setiawati H. Fermentation of Whey Waste as Organic Liquid Fertilizer "PUCAFU". *Agrotech*. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/331629753> [Accessed 21 Mar 2026].
20. Hernandez AJ. Milk beverage base with lactose removed with ultrafiltration: Effect of fat and protein concentration on sensory and physical properties. *Journal of Dairy Science*. 2023. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203022300632X> [Accessed 7 Mar 2026].
21. Carter BG. Invited review: Microfiltration-derived casein and whey proteins from milk. *Journal of Dairy Science*. 2021. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030221000126> [Accessed 11 Mar 2026].
22. Ionata E, Marcolongo L, La Cara F, Cetrangolo GP, Febbraio F. Improvement of functional properties of a thermostable β -glycosidase for milk lactose hydrolysis. *Biopolymers*. 2018;109(10):e23118.
23. Wit JND. Nutritional and Functional Characteristics of Whey Proteins in Food Products. *Journal of Dairy Science*. 1998;81(3):597-608. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030298756139> [Accessed 11 Mar 2026].
24. Jorge LV. Hydrolysis of Lactose: Conventional Techniques and Enzyme Immobilization Strategies on Polymeric Supports. In: *Milk Proteins - Technological Innovations, Nutrition, Sustainability and Novel Applications*. IntechOpen; 2023. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/1188731> [Accessed 21 Mar 2026].
25. de Moura Bell JMLN. Modeling lactose hydrolysis for efficiency and selectivity: Toward the preservation of sialyloligosaccharides in bovine colostrum whey permeate. *Journal of Dairy Science*. 2016. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216302909> [Accessed 9 Mar 2026].
26. Lamia A. Sustainable whey processing techniques: Innovations in derivative and beverage production. *Food Bioscience*. 2023. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212429223002936> [Accessed 11 Mar 2026].
27. Alali M. Nutraceuticals: Transformation of conventional foods into health promoters/disease preventers and safety considerations. *Molecules*. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/9/2540> [Accessed 10 Mar 2026].
28. Md RA. Probiotics and their applications in functional foods: a health perspective. *Applied Food Research*. 2025. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502225004986> [Accessed 21 Mar 2026].
29. Milk Powder Production. *Rotronic Measurement Solutions*. Available from: https://www.rotronic.com/media/news/files/1466670855_FF-Milk-Powder.pdf [Accessed 10 Mar 2026].

30. Mimouni A. Kinetics of lactose crystallization and crystal size as monitored by refractometry and laser light scattering: Effect of proteins. *Le Lait*. 2005. Available from: <http://www.edpsciences.org/10.1051/lait:2005015> [Accessed 11 Mar 2026].
31. Reig M. Use of Membrane Technologies in Dairy Industry: An Overview. *Foods*. 2021. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/11/2768> [Accessed 12 Mar 2026].
32. García-Burgos M. New perspectives in fermented dairy products and their health relevance. *Journal of Functional Foods*. 2020. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464620302838> [Accessed 21 Mar 2026].
33. Oluwatobi VO. Unveiling the role of functional foods with emphasis on prebiotics and probiotics in human health: A review. *Journal of Functional Foods*. 2024. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464624003396> [Accessed 11 Mar 2026].
34. Tsermoula P. Physicochemical properties and stability of milk permeate as influenced by ultrafiltration processing parameters. *International Dairy Journal*. 2024. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694624001250> [Accessed 21 Mar 2026].
35. Dekker PJT. Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits. *Nutrients*. 2019. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/3/551> [Accessed 10 Mar 2026].
36. Ramírez CA. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry. *Energy*. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544205001945> [Accessed 7 Mar 2026].
37. Sugita S. The impact of milk fat globule membrane with exercise on age-related degeneration of neuromuscular junctions. *Nutrients*. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/7/2310> [Accessed 10 Mar 2026].
38. Saqib S, Akram A, Halim SA, Tassaduq R. Sources of β -galactosidase and its applications in food industry. *3 Biotech*. 2017;7(1):79.
39. Thomas CF. Physicochemical properties of micellar casein retentates generated at different microfiltration temperatures. *Journal of Dairy Science*. 2023. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030223012079> [Accessed 10 Mar 2026].
40. Coolbear T. Heat-induced changes in the sensory properties of milk. *International Dairy Journal*. 2022. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958694621002272> [Accessed 21 Mar 2026].
41. Wong SY, Hartel RW. Crystallization in lactose refining—A review. *Journal of Food Science*. 2014;79(3):R257-R272.
42. Han X. Regulation of dietary fiber on intestinal microorganisms and its effects on animal health. *Animal Nutrition*. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405654523000756> [Accessed 10 Mar 2026].
43. Yanira IS. Individual and combined effect of pH and whey proteins on lactose crystallization. *Food Research International*. 2018. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996918306604> [Accessed 21 Mar 2026].
44. Zhang Y. Modelling of a milk powder falling film evaporator for predicting process trends and comparison of energy consumption. *Journal of Food Engineering*. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877418300281> [Accessed 21 Mar 2026].
45. Avtandilyan NG, Khalkechev RR, Lodygin AD. Formation of requirements for the composition and physicochemical parameters of lactose-containing raw materials for the production of lactulose concentrates. In: *Noveyshie dostizheniya v oblasti meditsiny, zdravookhraneniya i zdorovyesberegayushchikh tekhnologiy*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2022. P. 14-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/-I-IC-4>
46. Baranov SA, Evdokimov IA, Gordienko LA, Shramko MI. Effect of microparticulate whey proteins on the parameters of fermented milk drinks. *Dairy Industry*. 2020;(9):59-62. (In Russ.).

Информация об авторах

Софья Игоревна Фурсова – аспирант, ассистент кафедры прикладной биотехнологии факультета пищевой инженерии и биотехнологий имени академика А.Г. Храмцова, Северо-Кавказский федеральный университет, +79624278976, fursonya@yandex.ru.

Алексей Дмитриевич Лодыгин – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной биотехнологии, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пищевой и промышленной биотехнологии, факультет пищевой инженерии и биотехнологий имени

академика А.Г. Храмцова, Северо-Кавказский федеральный университет, +79288263918, allodygin@yandex.ru.

Иван Алексеевич Евдокимов – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий базовой кафедрой технологии молока и молочных продуктов, Северо-Кавказский федеральный университет, +78652956800, ievdokimov@ncfu.ru.

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Sofya I. Fursova – postgraduate student, assistant of the Department of Applied Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after Academician A.G. Khramtsov, North-Caucasus Federal University, +79624278976, fursonya@yandex.ru.

Aleksei D. Lodygin – Dr. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Biotechnology, Chief Researcher of the Research Laboratory of Food and Industrial Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after Academician A.G. Khramtsov, North-Caucasus Federal University, +79288263918, allodygin@yandex.ru.

Ivan A. Evdokimov – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Basic Department of Milk and Dairy Products Technology, North-Caucasus Federal University, +78652956800, ievdokimov@ncfu.ru.

Author contributions: the authors contributed equally to this article.