

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2571>
<https://elibrary.ru/VOZPCY>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Получение обогащенного белкового концентрата на основе молочной сыворотки



С. Н. Лебедева^{1,*}, А. В. Щёктова¹, Д. В. Атласова²,
Р. Б. Аюшеева¹, И. С. Хамагаева¹, Т. И. Котова¹

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления^{ROR}, Улан-Удэ, Россия

² Дальневосточный федеральный университет^{ROR}, Владивосток, Россия

Поступила в редакцию: 16.07.2024

Принята после рецензирования: 23.08.2024

Принята к публикации: 01.04.2025

*С. Н. Лебедева: lebedeva1959@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-5664-6028>

Д. В. Атласова: <https://orcid.org/0000-0002-8488-8427>

Р. Б. Аюшеева: <https://orcid.org/0009-0004-4958-2846>

И. С. Хамагаева: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>

Т. И. Котова: <https://orcid.org/0000-0003-2644-0779>

© С. Н. Лебедева, А. В. Щёктова, Д. В. Атласова, Р. Б. Аюшеева,
И. С. Хамагаева, Т. И. Котова, 2025



Аннотация.

Вопрос утилизации / переработки молочной сыворотки является актуальной проблемой молочных предприятий. Нерентабельность используемых методов и отсутствие энергосберегающих промышленных технологий замедляет решение данной проблемы. Молочная сыворотка – ценное сырье, содержащее более 200 органических и минеральных компонентов, из которого можно получать продукты, обладающие полезными биологическими свойствами. Цель работы – получить из творожной сыворотки обогащенный белковый продукт с использованием магниево-термокоагуляции белков и дальнейшей ферментации комплексной лактобактериальной закваской.

Объектом исследования послужила творожная сыворотка, полученная методом кислотно-сычужной коагуляции в процессе производства творога с массовой долей жира 9 %. Температура была доведена до +35–40 °С посредством водяной бани с последующим удалением жира и казеиновой пыли на сепараторе-сливкоотделителе. Осветление молочной сыворотки с получением пермеата проводили тепловой денатурацией при 92 ± 1 °С с добавлением 10 % раствора MgCl₂ × 6H₂O в концентрациях 2–42 г/л. Белок подвергли вакуумной фильтрации. Ферментация сывороточных белков осуществлялась комплексной закваской из четырех штаммов *Lactobacillus*. В исследовании использовались стандартные, общепринятые физико-химические и микробиологические методы.

В результате установлен оптимальный режим термомагниево-денатурации молочной сыворотки (92 ± 1 °С в течение 5–10 мин и MgCl₂ в количестве 18 г/л), способствующий максимальному выходу белка (25,0 г/л) и содержанию магния (2,4 мг/г). Ферментация магниевого концентрата термически осажденных белков молочной сыворотки закваской привела к активизации процесса протеолиза, формированию необходимых физико-химических и органолептических свойств. В результате сублимационной сушки –40 °С в течение 18–20 ч был получен сухой продукт с достаточным количеством живых клеток лактобактерий (1–3 × 10⁷) и содержанием магния 907 мг/100 г.

Разработанная технология позволила получить из молочной сыворотки магнийсодержащий концентрат термически осажденных белков с высокой биологической ценностью. Качественные показатели концентрата обеспечивают широкий спектр возможностей для применения в различных сферах пищевой индустрии.

Ключевые слова. Молочная сыворотка, термомагниево-коагуляция, белковый продукт, *Lactobacillus*

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20042, <https://rscf.ru/project/24-26-20042/>

Для цитирования: Лебедева С. Н., Щёктова А. В., Атласова Д. В., Аюшеева Р. Б., Хамагаева И. С. и др. Получение обогащенного белкового концентрата на основе молочной сыворотки. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 2. С. 257–271. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2571>

Fortified Protein Concentrate Based on Milk Whey



Svetlana N. Lebedeva^{1,*}, Anna V. Shchekotova¹,
Daria V. Atlasova², Radzhana B. Ayusheeva¹,
Irina S. Khamagaeva¹, Tatiana I. Kotova¹

¹ East Siberian State University of Technology and Management^{ROR}, Ulan-Ude, Russia

² Far Eastern Federal University^{ROR}, Vladivostok, Russia

Received: 16.07.2024

Revised: 23.08.2024

Accepted: 01.04.2025

*Svetlana N. Lebedeva: lebedeva1959@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-5664-6028>

Daria V. Atlasova: <https://orcid.org/0000-0002-8488-8427>

Radzhana B. Ayusheeva: <https://orcid.org/0009-0004-4958-2846>

Irina S. Khamagaeva: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>

Tatiana I. Kotova: <https://orcid.org/0000-0003-2644-0779>

© S.N. Lebedeva, A.V. Shchekotova, D.V. Atlasova, R.B. Ayusheeva,
I.S. Khamagaeva, T.I. Kotova, 2025



Abstract.

Utilization and processing of milk whey have become a pressing problem for the dairy industry as a result of unprofitable production methods and the poor energy-saving industrial technologies. Milk whey is a valuable raw material that contains more than 200 organic and mineral components. It can be processed into products with useful biological properties. The article describes a new fortified protein curd whey product obtained with magnesium thermal coagulation of proteins and fermented with a complex lactobacillus starter.

The curd whey was obtained by acid-rennet coagulation as a by-product of cottage cheese with a fat mass fraction of 9%. After +35–40°C in water bath, fat and casein powder were removed in a cream separator. The permeate was obtained by thermal denaturation at 92 ± 1°C with a 10% MgCl₂ × 6H₂O solution in concentrations of 2–42 g/L. The protein was then subjected to vacuum filtration. The fermentation of whey proteins involved a complex starter culture of four Lactobacillus strains. The research relied on standard physicochemical and microbiological methods.

The optimal mode for thermal magnesium denaturation of milk whey was 92 ± 1°C for 5–10 min with 18 g/L MgCl₂. It yielded 25.0 g/L protein with 2.4 mg/g magnesium. When the magnesium concentrate of thermally precipitated whey proteins was fermented with the complex starter culture, it activated the proteolysis process, as well as provided the targeted physicochemical and sensory properties. After freeze-drying at –40°C for 18–20 h, the powder obtained was rich in living lactobacilli cells (1–3 × 10⁷) and contained 907 mg/100 g magnesium.

The new method made it possible to turn whey wastes into a magnesium-containing concentrate of thermally precipitated proteins with increased biological value. Its qualitative indicators provide a wide range of possibilities in various areas of the food industry.

Keywords. Whey, thermal magnesium coagulation, protein product, probiotic cultures, *Lactobacillus*

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 24-26-20042, <https://rscf.ru/en/project/24-26-20042/>

For citation: Lebedeva SN, Shchekotova AV, Atlasova DV, Ayusheeva RB, Khamagaeva IS, et al. Fortified Protein Concentrate Based on Milk Whey. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(2):257–271. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2571>

Введение

Молочная сыворотка – основной побочный продукт, образующийся при производстве сыра и молочных продуктов на основе казеина. Мировое производство сыворотки оценивается в ≈ 200 млн т в год. При ежегодном приросте в 1–2 % к 2030 г. ее количество будет составлять ≈ 203–241 млн т. Однако перерабатывается ≈ 50 % от общего количества молочной сыворотки [1, 2].

Молочная сыворотка является ценным сырьем, содержащим полезные для человека органические

и минеральные вещества, в первую очередь сывороточные белки и лактозу. Сыворотка участвует в процессе производства продуктов питания, пищевых и кормовых добавок (сывороточные порошки, изоляты и концентраты сывороточного белка, гидролизаты сывороточного белка, лактозу, ее производные и др.) [3, 4].

Производство продуктов на основе молочной сыворотки не получило значительного распространения ввиду экономической нецелесообразности существующих технологических процессов, лимитированного

числа энергосберегающих промышленных установок и нерешенности проблемы безотходной переработки. Многокомпонентный физико-химический состав молочной сыворотки, отсутствие современного оборудования и устаревшая техника препятствуют ее комплексной и рациональной переработке. Согласно данным Всероссийского научно-исследовательского института маслоделия и сыроделия – филиала Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, количество производимой в России молочной сыворотки составляет ≈ 5 млн т. При этом перерабатывается только 20 % сыворотки, остальное ее количество используется в качестве прикормки для сельскохозяйственных животных или утилизируется в канализационную сеть, нанося ущерб окружающей среде [5].

Эффективное управление промышленными отходами имеет существенное значение для обеспечения экологической устойчивости. Проблема утилизации / переработки молочной сыворотки на предприятиях остается открытой. Экономические санкции и внедрение системы Меркурий, наряду с ужесточением нормативных требований к сбросу результатов продуктов переработки в сточные воды, стимулируют предприятия к поиску инновационных методов утилизации сыворотки.

Долгое время сыворотка считалась побочным продуктом молочной промышленности и использовалась в качестве кормовой добавки для животных или почвенного удобрения, а также утилизировалась в канализационную сеть [6, 7]. На сегодняшний день сыворотка редко применяется в качестве кормовой добавки для сельскохозяйственных животных в связи с проблемами, возникающими при ее транспортировке и обеспечении надлежащих условий хранения в хозяйствах. По законодательству сброс в окружающую среду сыворотки запрещен из-за ее высокой биохимической загрязняющей способности. Загрязнение от слитой 1 т молочной сыворотки в сточные воды сопоставимо загрязнению от 100 м³ отходов от бытовой и промышленной деятельности. Стоимость очистки сточных вод, загрязненных молочной сывороткой, равноценна расходам на очистку сточных вод в городе, где проживает 80 тыс. человек [8]. Экологическая токсичность сыворотки объясняется высокой органической нагрузкой за счет присутствия в ее составе лактозы и сывороточных белков. Сточные воды с сывороткой представляют угрозу для окружающей среды из-за высокой биологической и химической потребности в кислороде. Установлено, что биохимическая потребность в кислороде (БПК) у сыворотки составляет 30–50 г/л, а химическая потребность в кислороде (ХПК) – 60–80 г/л [9–11]. Сброс сыворотки в реки приводит к снижению уровня растворенного кислорода, проблемам эвтрофикации и токсичности, которые изменяют физико-химические свойства водных экосистем [12].

В 2019 г. вступили в силу поправки к Федеральному закону «О водоснабжении и водоотведении», пред-

усматривающие ужесточение требований к планам по снижению сбросов загрязняющих веществ в промышленные стоки по таким показателям, как БПК и ХПК [5]. В соответствии с требованиями ФЗ, молочная сыворотка должна быть полностью переработана. Цели устойчивого развития, сформулированные ООН на период до 2030 г. и утвержденные в 2015 г., акцентируют внимание на необходимости рационального управления отходами и снижения их выбросов. В условиях современных реалий, определяемых строгими нормативными актами, законами об охране окружающей среды и возрастающим вниманием общества к вопросам здоровья, промышленные предприятия вынуждены разрабатывать и внедрять комплексные подходы к утилизации и вторичному использованию сывороточных отходов [6].

Таким образом, учитывая глобальную ориентацию на повышение эффективности применения вторичного сырья молочного производства в пищевой промышленности и акцентирование внимания на экологической реновации предприятий, приоритетным направлением является углубленное изучение возможностей применения компонентов молочной сыворотки в роли самостоятельных функциональных ингредиентов для пищевых продуктов или в качестве составных элементов специализированных продуктов питания. При этом продукты, относящиеся к категории «функционального питания», должны обладать высокой усвояемостью ингредиентов и пищевой ценностью при низкой калорийности [13].

Сыворотка содержит ≈ 50 % сухих веществ и 20 % от общего количества белков молока. Она является источником лактозы, сывороточного белка, витаминов и молочных минералов. Ее состав представлен более чем 200 компонентами [3]. Различные типы сыворотки производятся в зависимости от методов, используемых для осаждения казеина. Наиболее распространенная сладкая сыворотка получается в результате осаждения казеина сычужным ферментом при pH 6,5 во время производства полутвердых и твердых сыров. Кислая сыворотка – побочный продукт производства сливочного сыра, творога, панира и греческого йогурта, где казеин осаждается молочной кислотой или минеральными кислотами при pH $\approx 4,6$. В целом более 70 % от общего количества сухого вещества в сыворотке составляет лактоза, в то время как 7,5–14 % – белки. Профиль сывороточных белков в основном состоит из β -лактоглобулина, α -лактальбумина, гликомакропептида (присутствует только в сычужной сыворотке из казеина, полученной на первом ферментативном этапе переработки сыра) и ряда второстепенных белковых / пептидных компонентов, таких как иммуноглобулины, бычий сывороточный альбумин, лактоферрин, лактопероксидаза и протеозопептон [14].

При переработке молочной сыворотки получают производные: сухая молочная сыворотка, сухая молочная сыворотка деминерализованная, сухой пермеат, белково-сывороточный концентрат, изолят и гидролизат

сывороточного белка, некоторые изолированные специальные белковые продукты, такие как лактоферрин и др. Сывороточные белки характеризуются высокой пищевой ценностью, обусловленной оптимальным аминокислотным составом, легкостью в переваривании и усвоении в организме [15]. Сывороточные белки играют важную роль в обработке пищевых продуктов в качестве эмульгатора – заменителя жира, желирующего и инкапсулирующего агента, и улучшают сенсорные и текстурные характеристики продуктов питания [3, 16].

Сывороточные белки обладают широким спектром биологических и терапевтических свойств, варьирующихся от противораковых, антигипертензивных и антимикробных эффектов. Многочисленные клинические исследования свидетельствуют об эффективности использования сыворотки в борьбе с такими заболеваниями, как рак, гепатит В, остеопороз, ВИЧ, сердечно-сосудистые заболевания и др. Недавние исследования показали, что употребление сыворотки помогает в профилактике COVID-19 за счет укрепления иммунной системы организма [17, 18].

В последние годы интерес к сыворотке значительно вырос. Сывороточные белки и сыворотка были «заново открыты». Они активно и успешно используются в различных промышленных областях. В пищевой и медицинской – в качестве среды для микрокапсулирования, пищевых покрытий, упаковочных пленок и для получения детской смеси. В мясной отрасли используются при производстве сосисок, колбас и др. продуктов. В молочной отрасли – при изготовлении сыра, мороженого, йогурта, напитков, холодных молочных десертов и др. Сывороточные белки и сыворотка нашли применение при производстве кондитерских, макаронных и хлебобулочных изделий, а также в биотехнологической, фармацевтической, косметической и кормовой промышленности [1, 3, 19, 20]. В 2021 г. мировой рынок сывороточных белков составил 5,33 млрд долл. США. За период 2022–2030 гг. прогнозируется годовой темп роста в 10,48 % [19].

Недавно были опубликованы разработки по превращению сыворотки в товары с добавленной стоимостью: биотопливо (биоэтанол, биодизель и биоводород), биопластики, бактериальная целлюлоза, пищевые красители и ароматизаторы, биозащитные растворы, биоактивные пептиды и белки [21–23].

При получении молочной сыворотки широкого спектра ценных производных в основном используются различные методы ее обработки (термические, физико-химические, электрофизические, химические и биотехнологические, и комбинированные). Цель таких исследований – обеспечить оптимальное выделение и использование всех компонентов молочной сыворотки, в том числе. сывороточных белков. Важна и экологическая составляющая, связанная с безотходной переработкой и сокращением энергетических затрат [24, 25].

Как свидетельствует зарубежный и российский опыт, наиболее эффективный метод выделения белков из сыворотки – использование мембранных процессов, которые позволяют фракционировать, очищать и концентрировать белковые молекулы с сохранением их первоначальных свойств при благоприятных температурных параметрах и наименьших расходах энергии (микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация, диафильтрация и обратный осмос) [25, 26]. Реализованы инновационные подходы к мембранной сепарации компонентов: двухступенчатая нанофильтрация и ультрафильтрационный процесс, гидрофильные модифицированные *UF*-мембраны, гидрофобная мембранная дистилляция, мембранная фильтрация с усилением сдвига и поперечная вибрационная мембранная фильтрация с модифицированными мембранными трубками [27].

Одним из наиболее передовых направлений фракционирования различных пищевых субстратов является мембранное разделение в биореакторах. Для переработки сыворотки перспективны мембранные биореакторы, объединяющие биокаталитические и мембранные процессы, которые используются для протеолиза сывороточных белков с максимальными антигенными, антидиабетическими и антигипертензивными свойствами [28].

Несмотря на преимущества данных методов при использовании в лабораторных условиях, на сегодняшний день они не получили широкого распространения на пищевых предприятиях. Причиной этому послужили высокие экономические затраты и трудности в техническом обслуживании оборудования, недостаточная научная основа (экспериментальная и теоретическая) в изучении мембранных технологий в применении ко множеству пищевых сред, включая молочную сыворотку [15, 26].

Наиболее простым методом выделения белковых фракций из молочной сыворотки считается термическое осаждение с использованием различных химических коагулянтов. Однако применение такого метода способствует значительному уменьшению растворимости белков сыворотки. Термическая обработка молочной сыворотки в диапазоне температур 60–140 °C приводит к трансформации строения и растворимости ее белков, в том числе α -лактальбумина и β -лактоглобулина [29].

Химические компоненты, в частности двухвалентные ионы металлов, хоть и используются для агрегации сывороточных белков, но все же их применение в данном процессе недостаточно исследовано. Например применение хлористого кальция эффективно только в свежей подсырной сыворотке, что обуславливает ограниченность его применения. В связи с отмеченными ранее особенностями для выделения сывороточных белков представляется перспективным применение такого комплексного подхода, как термическая денатурация с введением солей, содержащих другой (аналогичный) по валентности элемент, например

магний. Применение магния не окажет негативного влияния на процесс выделения белка из-за химического сходства между магнием и кальцием [29].

Магний является важным элементом для правильного развития и функционирования различных систем организма (сердечно-сосудистая, скелетная, мышечная, нервная, эндокринная и др.). Магний – важнейший кофактор в широком спектре биологических процессов, охватывающих более 600 видов деятельности, к которым относится регуляция прогрессирования клеточного цикла, дифференцировки и апоптоза. Он выполняет структурную функцию в нуклеиновых кислотах благодаря своей способности образовывать комплексы с отрицательно заряженными соединениями, такими как фосфаты. Магний участвует в различных биохимических процессах, включая окислительное фосфорилирование, генерацию энергии, синтез белков и нуклеиновых кислот и гликолиз. Этот фундаментальный ион также влияет на возбудимость нейронов, снижение мышечной функции и поддержание регулярного сердцебиения посредством активного транспорта других ионов через клеточные мембраны. Согласно недавнему исследованию, иммунные Т-клетки, которые борются с раковыми клетками и инфекционными агентами, нуждаются в достаточном количестве Mg для эффективного обнаружения, активации ответа и устранения патогенов [30].

Присутствие в молочной сыворотке двухвалентных металлических ионов, включая кальций и магний, приводит к значительному уменьшению растворимости белков сыворотки при термическом воздействии. Оптимальным подходом к регуляции растворимости белков является применение гидролитического процесса, который будет способствовать повышению их растворимости в кислой среде в присутствии ионов магния [29]. Гидролиз белков может осуществляться посредством ферментативного расщепления как индивидуальными ферментами (пептидазами), так и с участием микроорганизмов в ферментированных системах [23]. Использование молочнокислых бактерий с высокой протеолитической активностью позволяет получать ферментированные сывороточные белки с различной биологической активностью. Молочнокислые бактерии обладают отличительной протеолитической системой, включающей протеазу клеточной оболочки, транспортную систему и внутриклеточную пептидазу. Среди ее способностей – разрушение эпитопов молочных аллергенов и смягчение симптомов аллергии путем высвобождения пептидов с иммунорегуляторными свойствами. Микробиологическая ферментация считается более экономичной и безопасной по сравнению с ферментативным гидролизом [14].

Интеграция двух методов для выделения белка – термической денатурации в присутствии ионов магния и последующей ферментации белковой фракции молочнокислыми бактериями – будет способствовать максимальному увеличению выхода и чистоты сыворо-

точного белка с минимальными изменениями функциональных (технологических и биологических) свойств.

Цель работы – получить из творожной сыворотки обогащенный белковый продукт с использованием магниевой термокоагуляции белков и дальнейшей ферментации комплексной лактобактериальной закваской.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в научных лабораториях кафедры «Технология продуктов животного происхождения. Товароведение» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. Объектом послужила творожная сыворотка, выработанная методом кислотно-сычужной коагуляции в процессе производства творога с массовой долей жира 9 %. Температура была доведена до +35–40 °С посредством водяной бани с последующим удалением жира и казеиновой пыли на сепараторе-сливкоотделителе. Осветление сыворотки с получением пермеата проводили методом тепловой денатурации при 92 ± 1 °С путем добавления 10 % раствора соли $MgCl_2 \times 6H_2O$ в концентрациях 2–42 г/л, выраженных в сухой соли. Выделившийся белок отфильтровывали на приборе вакуумного фильтрования ПВФ-47/1 НБ. Исследование процесса ферментации сывороточных белков проводили с применением четырехштаммовой закваски молочнокислых микроорганизмов: *Lactobacillus curvatus* LCR-111-1, *L. plantarum* 8PA3, *L. fermentum* 44/1, *L. paracasei* к-406, которые были получены из Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (ГосНИИгенетика).

В ходе исследований использованы общепринятые стандартные методы: отбор проб и подготовка их к испытаниям (ГОСТ 3622-68); массовая доля влаги и сухих веществ (ГОСТ 3626-73); массовая доля жира (кислотный метод Гербера – ГОСТ 5867-90); массовая доля белка (метод Кьельдаля – ГОСТ Р 53951-2010); титруемая кислотность (ГОСТ 54669-2011 – титриметрический метод). Определение магния проводилось объемным методом (с добавлением оксалата аммония) с применением атомно-абсорбционного спектрофотометра Solar M-6 с пламенным атолизатором в Байкальском институте природопользования СО РАН. Степень гидролиза белка определялась путем вычисления отношения аминного азота к общему содержанию азота. Количество аминного азота в растворе определили с помощью метода формольного титрования, а концентрацию белковых веществ – методом Кьельдаля. Индекс растворимости сухого молочно-белкового концентрата определялся по ГОСТ Р ИСО 8156-2010. Для определения количества клеток лактобактерий применяли метод предельных разведений на питательной среде MRS-агар (ГОСТ Р 56139-2014).

Экспериментальные данные обрабатывали с использованием прикладных сервисных программ Microsoft Office Excel 2019.

Результаты и их обсуждение

Процесс денатурации сывороточных белков зависит от типа и количества применяемого коагулянта и от параметров и длительности термической обработки. В рамках данной работы рассмотрены влияние количества коагулянта на денатурацию белков сыворотки и содержание макроэлемента в протеиновой фракции и сывороточном пермеате. Нагрев сыворотки производился до температуры 85 °С, после чего образец выдерживался при данной температуре в течение 5–10 мин для исключения влияния растворимого кальция на процесс. Далее в образец добавляли разное количество хлорида магния (2–42 г/л в форме 10 % раствора при температуре 92 °С) и определяли выход белковых фракций, а также содержание макроэлемента в белке и пермеате. Полученные экспериментальные данные представлены в таблице 1.

В ходе анализа данных таблицы 1 было установлено, что добавление магния при термической коагуляции приводило к денатурации и выделению белков сыворотки. Данный факт подтверждается большим весом выделившегося белка по сравнению с контрольным образцом (образец 1). Белковые сгустки, полученные с использованием солевой денатурации, обладали более мягкой и хлопьевидной структурой по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о меньшей агрегации белковых частиц. Добавление хлорида магния до 18 г/л способствовало задержке более 50 % макроэлемента в белковой фракции (образцы 2–10). Увеличение его дозировки приводило к большему выделению макроэлемента с сывороточным пермеатом. При дозировке хлорида магния 18 г/л (образец 10) наблюдался максимальный выход осаждаемого белка (25 г из 1 л сыворотки) при содержании 2,4 мг магния

Таблица 1. Влияние дозировки коагулянта на выход сывороточных белков, содержание магния и характеристику полученных сгустков ($p \leq 0,05$)

Table 1. Effect of coagulant share on whey protein yield, magnesium content, and clots ($p \leq 0.05$)

Номер образца	Дозировка $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$, г/л	Содержание Mg, мг/кг		Выход белка, г/л	Характеристика сгустка и сыворотки		
		Белковый сгусток	Пермеат		Сгусток	Вкус	Сыворотка
1 (контроль)	0	163,63	135,2	$15,0 \pm 0,5$	рыхлый, хлопьевидный	кислый	мутная, желто-зеленого цвета
2	2,0	455,00	409,9	$16,0 \pm 0,5$	рыхлый, хлопьевидный, мягкий	кисловатый	мутная, желто-зеленого цвета
3	4,0	634,70	619,5	$17,0 \pm 0,5$	рыхлый, хлопьевидный, мягкий	кисловатый	мутная, желто-зеленого цвета
4	6,0	843,90	798,3	$18,0 \pm 0,5$	белковый, мягкий	солоноватый	желтого цвета
5	8,0	1546,70	1275,5	$19,0 \pm 0,5$	рыхлый, мягкий	солоноватый	мутная, желтого цвета
6	10,0	2032,40	1625,9	$20,0 \pm 0,5$	белковый, пастообразный, мягкий	солоноватый	желтого цвета
7	12,0	2222,65	1832,7	$21,0 \pm 0,5$	белковый, пастообразный, мягкий	с легкой горечью	желтого цвета
8	14,0	2454,90	2250,6	$22,0 \pm 0,5$	белковый, пастообразный, мягкий	с легкой горечью	желтого цвета
9	16,0	2117,41	2102,8	$23,0 \pm 0,5$	белковый, пастообразный, мягкий	с легкой горечью	желтого цвета
10	18,0	2462,80	2395,4	$25,0 \pm 0,5$	белковый, пастообразный, мягкий	с легкой горечью	желтого цвета
12	30,0	4128,65	4652,0	$24,0 \pm 0,6$	белковый, пастообразный, мягкий	горький	желтого цвета
13	42,0	4419,40	4906,6	$23,0 \pm 0,5$	белковый, пастообразный, мягкий	очень горький	желтого цвета

в 1 г белка ($p \leq 0,05$). Дальнейшее увеличение количества используемого коагулянта ($MgCl_2 \times 6H_2O$) не способствовало повышению выхода белка, напротив, органолептические показатели сгустка ухудшились (образцы 12,13). Повышение концентрации магния в белковых коагулятах при увеличении его дозировки обусловлено его взаимодействием с сывороточными белками в процессе коагуляции. Данный факт может быть обусловлен как активной сорбцией ионов магния на поверхности белковой частицы, так и формированием устойчивых хелатных комплексов [31].

Для подтверждения хелатной формы полученного комплекса магния с белковыми структурами был проведен ИК-спектроскопический анализ контрольного образца и белкового сгустка, выделенного при внесении 18 г/л магниевой соли (рис. 1).

Металлические комплексы или хелаты в основном имеют ковалентную природу, и в спектрах таких соединений доминантным является вклад лигандов и их координационная химия [32]. Металлоорганические соединения содержат лиганды, связанные через углеродные связи с атомами металла или ионами. У металлоорганических соединений металлоуглеродные валентные волновые числа проявляются в диапазоне $600\text{--}400\text{ см}^{-1}$, при этом более легкие металлы имеют полосы при более высоких значениях. Именно в этом диапазоне наблюдался скачок ИК-спектра у опытного образца – белкового сгустка, выделенного при внесении 18 г/л магниевой соли. Данный пик входит в диапазон ИК-спектра гипотетической модели, что свидетельствует об образовании химических связей между магнием и сывороточными белковыми структурами.

Макро- и микроэлементы в составе хелатного комплекса (т. е. в органической форме), в отличие от их ионной (т. е. неорганической) формы, не требуют дополнительных модификаций в организме, активно всасываются клетками кишечного эпителия, что повышает их биодоступность [33].

Сывороточные белки обладают уникальными особенностями, и их применение способствует открытию перспектив для получения белковых добавок, обогащенных магнием. Для минимизации риска аллергических реакций, вызываемых сывороточными белками, требуется их биотрансформация с использованием микроорганизмов. Она активизирует биохимические процессы в белковой системе, улучшает органолептические свойства и повышает пищевую и биологическую ценность продукта [3].

Пробиотические бактерии являются наиболее перспективными для проведения биотрансформации, поэтому использование бактерий семейств *Lactococcus* и *Lactobacillus* позволяет снизить аллергенность молочной сыворотки [34].

В предыдущих исследованиях была разработана закваска на основе консорциума четырех штаммов пробиотических культур (*Lactobacillus curvatus* LCR-111-1, *L. plantarum* 8PA3, *L. fermentum* 44/1, *L. paracasei* к-406). Для них характерна общая оптимальная температура культивирования, составляющая $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, сходная динамика роста и высокая устойчивость к бактериоцинам, продуцируемым каждым из них. Совместное культивирование выбранных штаммов способствовало сокращению цикла ферментации, а также количественному увеличению живых клеток *Lactobacillus*,

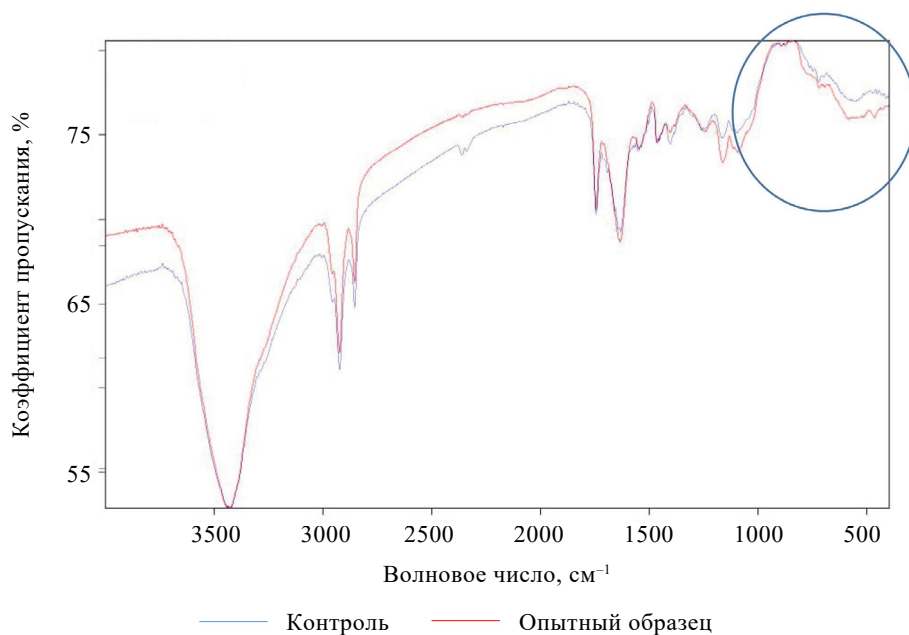


Рисунок 1. ИК-спектроскопический анализ связанных форм магния с белковыми структурами молочной сыворотки

Figure 1. IR spectroscopy of bound magnesium with protein whey structures

по сравнению с применением монозаквасок. Данный консорциум обладал высокими производственными, функциональными и технологическими свойствами [35].

Процесс ферментации магнийсодержащей белковой массы разработанной поликомпонентной пробиотической закваской был изучен. Магнийсодержащий концентрат термически осажденных белков молочной сыворотки (далее – Mg-содержащий концентрат), полученный в соответствии с выбранными ранее технологическими режимами, охлаждали до 37 ± 2 °C, удаляли ≈ 50 –60 % сыворотки и добавляли разную дозировку поликомпонентной закваски. Ферментацию проводили путем внесения 3, 5, 7 и 10 % закваски до достижения кислотности сгустков 88–90 °T. Эта кислотность считается наиболее подходящей для ферментированных белковых продуктов с позиции качества и диетических свойств. По увеличению показателя кислотности и росту клеток судили об активности биохимических процессов у лактобактерий в процессе ферментации (табл. 2, рис. 2).

Из экспериментальных данных следует, что *Lactobacillus* хорошо развивались в Mg-содержащем концентрате, хотя темп роста кислотности был несколько замедлен (табл. 2). Высокая биологическая ценность белков сыворотки, вероятно, создает благоприятные условия для развития пробиотических лактобактерий. Отмечено, что с увеличением дозировки закваски

наблюдалось увеличение титруемой кислотности во всех исследуемых образцах. Увеличение дозировки закваски с 3 до 5–7 % приводило к сокращению продолжительности процесса ферментации на 2 ч, таким образом, через 4 ч процесса достигалась необходимая кислотность – 90 °T ($p \leq 0,05$). При дальнейшем увеличении дозировки закваски до 10 % продолжительность ферментации сокращалась незначительно.

Из данных, приведенных на рисунке 2, следует, что лактобактерии начинали развиваться в Mg-содержащем концентрате на раннем этапе культивирования. После 2 ч процесса ферментации при внесении 5, 7 и 10 % закваски во всех исследуемых образцах концентрация живых лактобактерий достигала $(1\text{--}5) \times 10^5$ КОЕ/см³, а через 4 ч количество клеток лактобактерий возрастало до $(2\text{--}6) \times 10^8$ КОЕ/см³ ($p \leq 0,05$). Дальнейшее увеличение времени (до 6 часов) ферментации не приводило к увеличению количества клеток лактобактерий.

Белки в процессе пищеварения расщепляются до пептидов и отдельных аминокислот, которые затем попадают в кровь. Пептиды, образующиеся в процессе гидролиза белка, обладают рядом биоактивных свойств, главное из которых – более быстрое усвоение по сравнению с исходной белковой молекулой.

В процессе ферментации комбинированной закваской *Lactobacillus* была определена степень ферментативного гидролиза белковых сгустков. В качестве

Таблица 2. Влияние дозировки пробиотической закваски на активность кислотообразования при ферментации Mg-содержащего концентрата ($p \leq 0,05$)

Table 2. Effect of probiotic starter share on acid-forming activity during fermentation of magnesium-containing concentrate ($p \leq 0.05$)

Дозировка закваски, %	Кислотность, °T					
	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч	5 ч	6 ч
3	63,0 ± 3,0	69,0 ± 1,0	74,0 ± 1,0	82,0 ± 2,0	86,0 ± 1,0	90,0 ± 1,0
5	64,0 ± 2,0	70,0 ± 3,0	78,0 ± 2,0	90,0 ± 1,0	92,0 ± 2,0	98,0 ± 2,0
7	65,0 ± 1,0	72,0 ± 1,0	84,0 ± 1,0	91,0 ± 1,0	96,0 ± 2,0	99,0 ± 1,0
10	66,0 ± 2,0	73,0 ± 2,0	85,0 ± 1,0	93,0 ± 3,0	99,0 ± 1,0	103,0 ± 1,0

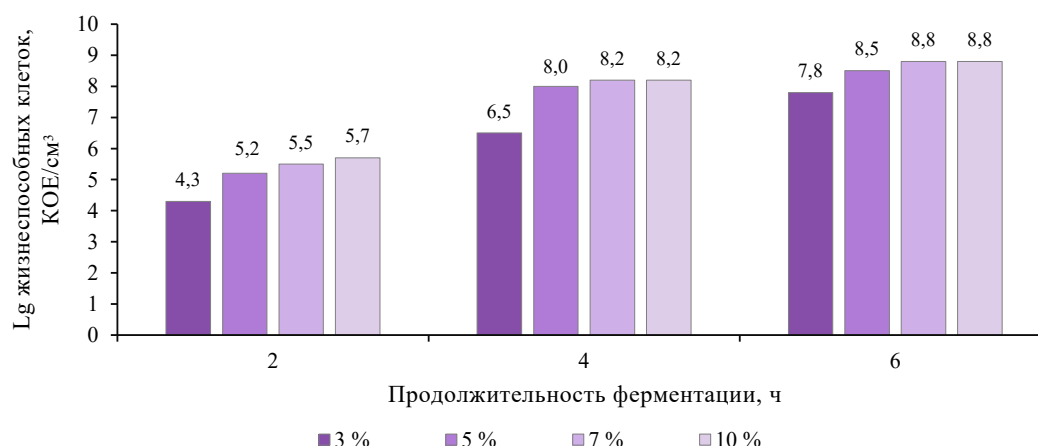


Рисунок 2. Влияние дозировки пробиотической закваски на рост клеток лактобактерий

Figure 2. Effect of probiotic starter share on lactobacilli cell growth

контроля рассматривали гидролиз с применением фермента животного происхождения (пепсин) при соотношении фермент:субстрат – 1:100.

Для ферментации сывороточных белковых сгустков лактобактериями достаточно 4 ч, далее увеличение степени гидролиза не отмечалось (рис. 3). Эффективность гидролиза протеиназами четырех штаммов *Lactobacillus* сопоставима с гидролизом пепсином, что свидетельствует о больших перспективах использования комбинированной закваски на основе подобранного микробного консорциума в качестве источника протеаз в различных отраслях пищевой промышленности и биотехнологии.

В таблице 3 приведены результаты исследований, отражающие влияние процесса ферментации закваской на формирование основных органолептических показателей Mg-содержащего концентрата. Контролем служил концентрат, полученный путем термоосаждения с использованием хлорида магния без ферментации.

Органолептический анализ исследуемых образцов показал, что ферментированный образец Mg-содержащего концентрата обладал лучшими показателями

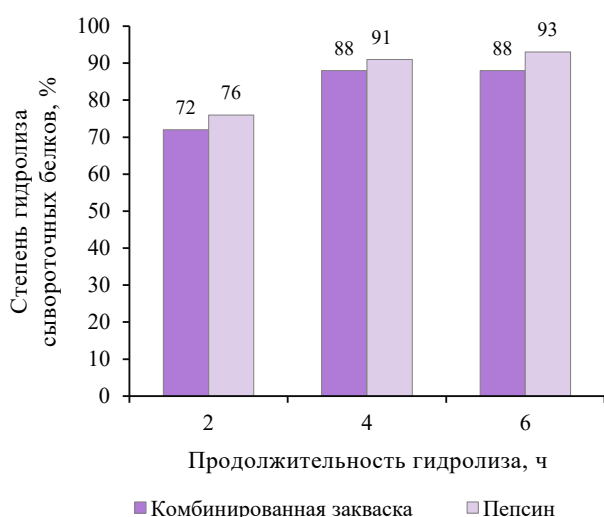


Рисунок 3. Динамика гидролиза сывороточных белков в процессе ферментации Mg-содержащего концентрата поликомпонентной закваской и пепсином

Figure 3. Whey protein hydrolysis during fermentation of magnesium-containing concentrate with multicomponent starter and pepsin

по сравнению с контролем. После ферментации в образце не только улучшалась консистенция, но и практически полностью пропадали горький привкус.

Применение ферментации белковых масс лактобактериальной закваской способствовало активизации процесса протеолиза в Mg-содержащем концентрате и созданию необходимых органолептических и физико-химических свойств и увеличивало у продукта пищевую и биологическую ценность. Лактобактерии активно развивались в белковом субстрате, выделенном из сывотки методом термомагниевого осаждения. Данное обстоятельство указывает на пребиотические свойства сывороточных белков. Выполненные исследования позволили установить следующие рациональные режимы ферментации Mg-содержащего концентрата комбинированной закваской: дозировка закваски – 5–7 %, продолжительность ферментации – 4 ч.

В соответствии с данными литературы, дополнительное введение в среду любого металла неизбежно повлияет на развитие и активность бактерий, изменяя интенсивность и направленность биохимических и микробиологических процессов [36]. При взаимодействии микроорганизмов с металлами биологический эффект будет зависеть от степени токсичности и метаболического потенциала микроорганизмов. Практически по отношению к любому элементу могут быть установлены три значения его концентрации, при которых: металл нужен для поддержания нормального метаболизма клетки; металл находится в избытке и ингибирует метаболизм; металл в смертельной дозировке необратимо подавляет развитие клеточной популяции.

В связи с этим определено влияние магния в концентрате на жизнеспособность лактобактерий (табл. 4). Контролем послужил концентрат, полученный термическим осаждением без внесения каких-либо коагулянтов и ферментированный комбинированной закваской.

Обогащение концентрата магнием оказывало существенное влияние на рост и развитие лактобактерий (табл. 4). Магний в количестве 185 мг/100 г повышал активность роста пробиотических культур. В течение всего процесса ферментации количество жизнеспособных клеток *Lactobacillus* в Mg-содержащем концентрате на 1–2 порядка выше, чем в контроле. Данное обстоятельство свидетельствует об интенсификации метаболизма пробиотических лактобактерий в присутствии ионов магния.

Таблица 3. Органолептические показатели Mg-содержащего концентрата после ферментации

Table 3. Sensory profile of magnesium-containing concentrate after fermentation

Образец	Консистенция	Вкус и запах	Цвет
Контроль	Однородная, белковая, суховатая, плотная	Чистый, слегка горьковатый, с соленым привкусом	Белый с сероватым оттенком
Mg-содержащий концентрат, ферментированный комбинированной закваской	Однородная, нежная, белковая, мажущаяся	Чистый, кисломолочный	Белый с сероватым оттенком

Таблица 4. Влияние магния на рост лактобактерий при ферментации концентрата сывороточного белка

Table 4. Effect of magnesium on lactobacilli during fermentation of whey protein concentrate

Образец	Количество жизнеспособных клеток лактобактерий во время ферментации, КОЕ/см ³			
	2 ч	4 ч	6 ч	8 ч
Контроль	1×10^4	3×10^6	2×10^7	5×10^7
Mg-содержащий концентрат	3×10^5	2×10^8	4×10^8	1×10^9

Таблица 5. Элементный состав обогащенных магнием молочно-белковых концентратов

Table 5. Elemental composition of magnesium-fortified milk protein concentrates

Исследуемый спектр	Элементный состав, в весовых %							
	C	O	P	S	Cl	K	Ca	Mg
Mg-содержащий концентрат неферментированный								
Спектр 1	52,22	37,51	2,69	1,67	1,00	1,05	0,97	2,90
Спектр 2	57,00	36,70	1,76	1,05	0,54	0,43	0,32	2,20
Спектр 3	63,36	27,53	3,00	1,54	0,97	0,92	0,78	1,90
Среднее	57,52	33,91	2,48	1,42	0,84	0,80	0,69	2,30
Ст. откл.	5,18	5,29	0,65	0,34	0,26	0,32	0,33	0,24
Mg-содержащий концентрат, ферментированный комбинированной закваской								
Спектр 1	44,72	45,50	2,13	0,50	0,48	0,45	0,98	5,24
Спектр 2	43,40	48,98	1,80	0,43	0,25	0,19	0,67	4,28
Спектр 3	60,76	30,11	2,36	0,66	0,65	0,39	0,94	4,13
Спектр 4	42,63	51,15	1,74	0,37	0,24	0,25	0,33	3,29
Среднее	487,87	43,90	2,05	0,49	0,40	0,34	0,76	4,23
Ст. откл.	8,29	9,51	0,29	0,13	0,19	0,12	0,86	0,85

Далее был рассмотрен профиль распределения элементного состава ферментированного и неферментированного Mg-содержащего концентрата (табл. 5, рис. 4). Ферментация приводила к значительному увеличению в исследуемых образцах содержания магния. Количество магния в концентрате, ферментированном комбинированной закваской, возрастало в 1,8 раза (по среднему показателю) ($p \leq 0,05$). Представленные результаты исследований подтверждают, что пробиотические культуры способны аккумулировать на своей поверхности значительное количество ионов макроэлементов в различных формах, создавая тем самым своеобразное «депо» этих катионов [30, 37]. Связанный таким образом магний не теряется с сывороткой при обезвоживании белковых стустков.

Наличие магния в концентрате значительно влияло на рост и жизнеспособность пробиотических культур. Пробиотические лактобактерии, повышали количество и усвояемость данного элемента в ферментированном концентрате.

Сушка полученного ферментированного Mg-содержащего концентрата является одним из эффективных способов сохранения качества для его дальнейшего использования. Были подобраны параметры сублимационного высушивания, которые обеспечивали минимальные повреждения белковых структур и повышали сроки хранения продукта.

Для сохранения природных свойств разрабатываемого продукта и с учетом термостабильности лактобактерий начальный температурный параметр сушки

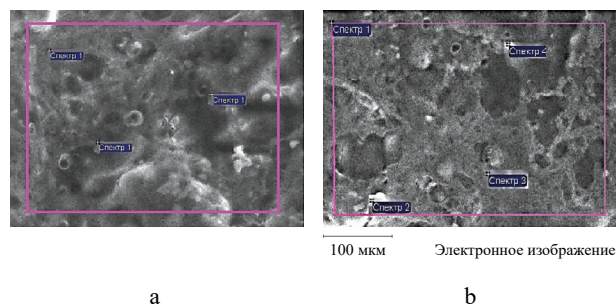


Рисунок 4. Микроструктура образцов:
а – Mg-содержащий концентрат неферментированный;
б – Mg-содержащий концентрат, ферментированный комбинированной закваской

Figure 4. Microstructural analysis: a – unfermented magnesium-containing concentrate; b – magnesium-containing concentrate fermented with complex starter

замороженного концентрата составил -18°C . Досушивание осуществляли при щадящем температурном режиме: -40°C под давлением от 0,13 до 1,3 Па. Сушку приостанавливали после достижения заданной остаточной влажности, не превышающей 5 %, при этом продолжительность процесса составляла в среднем 18–20 ч. Дальнейшее увеличение времени высушивания не приводило к уменьшению массовой доли влаги в продукте. В таблице 6 приведены качественные показатели Mg-содержащего концентрата до и после высушивания.

Таблица 6. Качественные показатели Mg-содержащего ферментированного концентрата до и после высушивания ($p \leq 0,05$)

Table 6. Qualitative parameters of magnesium-containing fermented concentrate before and after drying ($p \leq 0.05$)

Определяемые показатели	До высушивания	После высушивания
Внешний вид	Однородная, нежная, белковая, мажущаяся консистенция	Пористые комочки разного размера, легко рассыпающиеся при сдавливании
Запах и вкус	Чистый, кисломолочный	Без запаха, кисломолочный
Цвет	Белый с сероватым оттенком	Белый с сероватым оттенком
Массовая доля магния, мг/100 г	$246,0 \pm 0,7$	$907,0 \pm 0,4$
Массовая доля белка, %	$13,0 \pm 0,6$	$40,0 \pm 0,2$
Массовая доля влаги, %	$45,0-50,0$	$4,0 \pm 0,9$
Индекс растворимости, см ³ сырого осадка	–	$0,5 \pm 0,8$
Количество жизнеспособных клеток лактобактерий, КОЕ/см ³	$(2-6) \times 10^8$	$(1-3) \times 10^7$

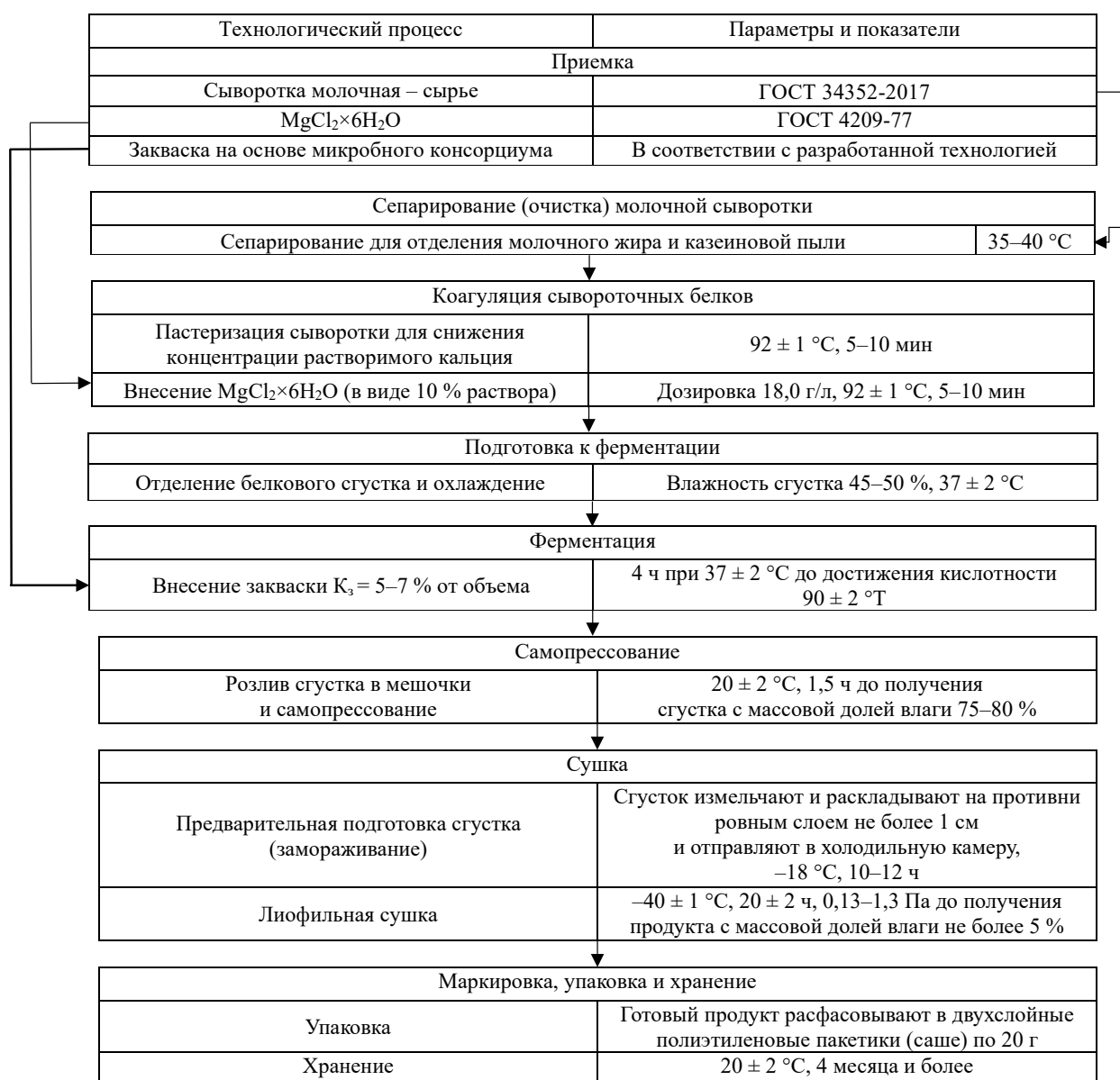


Рисунок 5. Технологическая схема получения сухого ферментированного Mg-содержащего белкового концентрата

Figure 5. Technological scheme for fermented magnesium-containing protein concentrate powder

Таблица 7. Качественные показатели ферментированного белкового концентрата, обогащенного магнием и пробиотическими культурами ($p \leq 0,05$)Table 7. Qualitative indicators of fermented protein concentrate fortified with magnesium and probiotic cultures ($p \leq 0.05$)

Показатели		Характеристики
Внешний вид		Пористые комочки разного размера, рассыпающиеся при сдавливании
Вкус и запах		Без запаха, кисломолочный
Цвет		Белый с сероватым оттенком
Содержание магния мг/100 г		907,0 $\pm$ 0,4
Массовая доля влаги, %		4,0 $\pm$ 0,9
Массовая доля белка, %		40,0 $\pm$ 0,2
Индекс растворимости, см ³ сырого осадка		0,5 $\pm$ 0,8
Активная кислотность, pH		4,0–4,5
Количество жизнеспособных клеток лактобактерий, КОЕ/см ³		(1–3) $\times$ 10 ⁷
Объем (масса) продукта, см ³ (г), в котором не допускаются	БГКП (колиформы)	1
	Патогенные, в том числе сальмонеллы:	25
	Стафилококки <i>S. aureus</i>	1
	Листерии <i>L. monocytogenes</i>	–
Дрожжи, плесени, КОЕ/см ³ (г), не более		–

После высушивания у концентрата значительно увеличилось содержание магния и белка. Так, было установлено, что применение лиофильного высушивания ферментированного продукта способствовало увеличению массовой доли белковых веществ в Mg-содержащем концентрате в 3 раза по сравнению с контролем ($p \leq 0,05$). Количество магния в концентрате увеличивалось в 3,7 раза ($p \leq 0,05$). После процесса сушки количество жизнеспособных клеток лактобактерий оставалось на достаточно высоком уровне и составляло порядка 10⁷ КОЕ/см³. Таким образом, выбранный режим высушивания (–40 °C в течение 18–20 ч) обеспечивал значительное увеличение содержания магния и белка при достаточно высоком уровне выживаемости пробиотических лактобактерий в концентрате.

На основе полученных экспериментальных данных была составлена технологическая схема получения сухого белкового концентрата, обогащенного функциональными компонентами (магнием и пробиотическими культурами), а также способствующая реализации принципа безотходной технологии (рис. 5).

Готовая сухая ферментированная белковая добавка, обогащенная магнием и пробиотическими культурами, должна удовлетворять требованиям, представленным в таблице 7.

Представленная технология обеспечивает получение магнийсодержащего белкового концентрата с многофункциональными свойствами и высокой биологической ценностью. Употребление разработанного белкового продукта индивидуально или включение его как компонента в другие продукты питания позволит не только восстановить недостаточное количество белка и магния в организме, но и стабилизировать желудочно-кишечный микробиом. Функциональные показатели

разработанного обогащенного концентрата открывают широкий спектр возможностей для его использования в различных сферах пищевой индустрии.

Выводы

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что молочная сыворотка, которая изначально на протяжении десятилетий рассматривалась как бесполезный побочный продукт производства, сегодня приобрела значение как ценный источник функциональных компонентов, обладающих высокой усвояемостью.

Установлен оптимальный режим термомагнито-денатурации молочной сыворотки – температура 92 $\pm$ 1 °C, продолжительность 5–10 мин и количество MgCl₂ равное 18 г/л – способствующий максимальному выходу белка (25,0 г/л) и содержанию Mg (2,4 мг/г). Ферментация магниевого концентрата термически осажденных белков молочной сыворотки лактобактериальной закваской приводила к активизации протеолиза и формированию у продукта необходимых физико-химических и органолептических показателей. Сублимационная сушка при температуре –40 °C в течение 18–20 ч позволила получить сухой Mg-содержащий концентрат с высоким количеством живых клеток лактобактерий (1–3 $\times$ 10⁷) и содержанием магния 907 мг/100 г белка.

Объединение нескольких операций (термохимическая коагуляция и микробная ферментация) в единый биологический процесс способствовало извлечению компонентов молочной сыворотки с ценными функциональными свойствами и максимальному использованию ее потенциала. Предлагаемый метод переработки сыворотки содействует разрешению экологической проблемы, связанной с ее утилизацией, и одновременно обеспечивает производство безо-

пасной и высококачественной продукции, обладающей функциональными свойствами.

Таким образом, открывая новые аспекты и развивая существующие методы, была разработана технология получения из молочной сыворотки концентрата термически осажденных белков. Они обогащены магнием и пробиотическими культурами, поэтому эту технологию можно использовать для создания новых функциональных продуктов, минимизируя потребляемые ресурсы и снижая негативное влияние на окружающую среду.

Исследования по использованию сывороточного белка имеют большой потенциал в различных областях. Разработка новых функциональных продуктов питания, включающих сывороточные белки, может потенциально решить проблему некоторых неинфекционных заболеваний и иметь дополнительные преимущества с точки зрения технологических (сенсорных и текстурных) характеристик.

Разработка новых адаптивных процессов и инновационных продуктов из сывороточного белка открывает

большие перспективы для этих технологий. Но их внедрение в промышленные условия потребует модернизации перерабатывающих предприятий, обучения производственного персонала.

Критерии авторства

Авторы в равной степени принимали участие в исследовании и оформлении рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Buchanan D, Martindale W, Romeih E, Hebishy E. Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *International Journal of Dairy Technology*. 2023;76(2):291–312. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>
2. Perez-Marroquín XA, Estrada-Fernández AG, García-Ceja A, Aguirre-Álvarez G, León-López A. Agro-food waste as an ingredient in functional beverage processing: Sources, functionality, market and regulation. *Foods*. 2023;12(8):1583. <https://doi.org/10.3390/foods12081583>
3. Паладий И. В., Вrabie Е. Г., Спринчан К. Г., Болога М. К. Молочная сыворотка: обзор работ. Часть 1. Классификация, состав, свойства, производные, применение. Электронная обработка материалов. 2021. Т. 57. № 1. С. 52–69. [Paladii IV, Vrabie EG, Sprincian CG, Bologa MK. Whey: The state of the Art. Part I. Classification, composition, properties, derivatives, applications. *Electronic processing of raw materials*. 2021;57(1):52–69. (In Russ.)] <https://doi.org/10.5281/zenodo.4456698>
4. Мельникова Е. И., Богданова Е. В., Павельева Д. А. Мировой и российский рынок сывороточных ингредиентов. Молочная промышленность. 2020. № 8. С. 56–58. [Melnikova EI, Bogdanova EV, Paveleva DA. The world and Russian market of whey ingredients. *Dairy Industry*. 2020;(8):56–58. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/WZHSMF>
5. Кручинин А. Г., Шилова Е. Е. Исследование процесса баромембраной фильтрации подсырной и творожной сывороток. Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т. 1. № 1. С. 298–305. [Kruchinin AG, Shilova EE. The investigation of the process of cheese whey and quark whey barometric filtration. *Current issues of the dairy industry, inter-industry technologies, and quality management systems*. 2020;1(1):298–305. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-298-305>
6. Soumati B, Atmani M, Benabderrahmane A, Benjelloun M. Whey valorization – Innovative strategies for sustainable development and value-added product creation. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(10):86–104. <https://doi.org/10.12911/22998993/169505>
7. Guo M, Wang G. History of whey production and whey protein manufacturing. In: Guo M, editor. *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2019. pp. 1–12. <https://doi.org/10.1002/9781119256052.ch1>
8. El-Aidie SAM, Khalifa GSA. Innovative applications of whey protein for a sustainable dairy industry: Environmental and technological perspectives – a comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024; 23(2):e13319. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13319>
9. Chen GQ, Qu Y, Gras SL, Kentish SE. Separation technologies for whey protein fractionation. *Food Engineering Reviews*. 2023;15(3):438–465. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09330-2>
10. Smithers GW. Whey and whey proteins from ‘gutter-to-gold’. *International Dairy Journal*. 2008;18(7):695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>

11. Smithers GW. Whey-ing up the options – Yesterday, today and tomorrow. *International Dairy Journal*. 2015;48:2–14. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.01.011>
12. Ayed L, M'hir S, Asses N. Sustainable whey processing techniques: Innovations in derivative and beverage production. *Food Bioscience*. 2023;53:102642. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102642>
13. Молибога Е. А., Сухостав Е. В., Козлова О. А., Зинич А. В. Анализ рынка функционального питания: российский и международный аспект. *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 4. С. 775–786. [Moliboga EA, Sukhostav EV, Kozlova OA, Zinich AV. Functional food market analysis: Russian and international aspects. *Food Processing: Techniques and technology*. 2022;52(4):775–786. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2405>
14. Minj S, Anand S. Whey proteins and its derivatives: Bioactivity, functionality and current applications. *Dairy*. 2020;1(3):233–258. <https://doi.org/10.3390/dairy1030016>
15. Мельникова Е. И., Станиславская Е. Б., Богданова Е. В., Шабалова Е. Д. Особенности получения и применения мицеллярного казеина в технологии молокоемких белковых продуктов. *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 3. С. 592–601. [Melnikova EI, Stanislavskaya EB, Bogdanova EV, Shabalova ED. Micellar casein production and application in dairy protein industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):592–601. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2389>
16. O'Donoghue LT, Murphy EG. Nondairy food applications of whey and milk permeates: Direct and indirect uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023;22(4):2652–2677. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13157>
17. Pillai AT, Morya S, Kasankala LM. Emerging trends in bioavailability and pharma-nutraceutical potential of whey bioactives. *Journal of Nutrition and Metabolism*. 2024;2024(1):8455666. <https://doi.org/10.1155/2024/8455666>
18. Zhao C, Chen N, Ashaolu TJ. Whey proteins and peptides in health-promoting – A review. *International Dairy Journal*. 2022;126:105269. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105269>
19. Hameed A, Anwar MJ, Perveen S, Amir M, Naeem I, et al. Functional, industrial and therapeutic applications of dairy waste materials. *International Journal of Food Properties*. 2023;26(1):1470–1496. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2213854>
20. Jakopović KL, Jurina IB, Božanić R. Trends in utilization of whey and buttermilk – Valuable by-products of the dairy industry. In: Spizzirri UG, editor. *Nutraceuticals from Agri-Food By-Products*. Beverly, MA: Scrivener Publishing; 2023. pp. 245–283. <https://doi.org/10.1002/9781394174867.ch8>
21. Goyal C, Dhyani P, Rai DC, Tyagi S, Dhull SB, et al. Emerging trends and advancements in the processing of dairy whey for sustainable biorefining. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2023;2023(1):6626513. <https://doi.org/10.1155/2023/6626513>
22. Soumati B, Atmani M, Benabderrahmane A, Benjelloun M. Whey valorization – Innovative strategies for sustainable development and value-added product creation. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(10):86–104. <https://doi.org/10.12911/22998993/169505>
23. Olvera-Rosales LB, Cruz-Guerrero AE, García-Garibay JM, Gómez-Ruiz LC, Contreras-López E, et al. Bioactive peptides of whey: Obtaining, activity, mechanism of action, and further applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(30):10351–10381. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2079113>
24. Паладий И. В., Вrabie Е. Г., Спринчан К. Г., Болога М. К. Молочная сыворотка: обзор работ. Часть 2. Процессы и методы обработки. *Электронная обработка материалов*. 2021. Т. 57. № 3. С. 83–101. [Paladii IV, Vrabie EG, Sprincian CG, Bologna MK. Whey: The state of the Art. Part II. Processes and treatment methods. *Electronic processing of raw materials*. 2021;57(3):83–101 <https://elibrary.ru/BEZPSE>
25. Chen GQ, Qu Y, Gras SL, Kentish SE. Separation technologies for whey protein fractionation. *Food Engineering Reviews*. 2023;15:438–465. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09330-2>
26. Лазарев В. А. Разделение и концентрирование молочной сыворотки на ультрафильтрационных и обратно-осмотических мембранах: дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.18. Екатеринбург, 2015. 119 с. [Lazarev VA. Separation and concentration of whey using ultrafiltration and reverse osmosis membranes: Cand. Sci. Eng. Diss. Ekaterinburg, 2015. 119 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/CLFTDG>
27. Satya R, Singh A, Rasane P, Poonia A, Singh J, et al. Recent trends in membrane processing of whey. In: Poonia A, Petkoska AT, editors. *Whey valorization: Innovations, technological advancements and sustainable exploitation*. Singapore: Springer Nature; 2023. pp. 323–353. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_16
28. Ryazantseva KA, Agarkova EYu, Fedotova OB. Continuous hydrolysis of milk proteins in membrane reactors of various configurations. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):271–281. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-271-281>
29. Манылов С. В. Исследование влияния денатурированных сывороточных белков на свойства низкокалорийных молочно-белковых продуктов: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04. Кемерово, 2009. 156 с. [Manylov SV. Effect of denatured whey proteins on low-calorie milk-protein products. Cand. Sci. Eng. Diss. Kemerovo, 2009. 156 p.] <https://www.elibrary.ru/NQOOBV>
30. Ferenc K, Sokal-Dembowska A, Helma K, Jarmakiewicz-Czaja S, Motyka E, et al. Modulation of the gut microbiota by nutrition and its relationship to epigenetics. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(2):1228. <https://doi.org/10.3390/ijms25021228>

31. Oztop MH, McCarthy KL, McCarthy MJ, Rosenberg M. Monitoring the effects of divalent ions (Mn^{+2} and Ca^{+2}) in heat-set whey protein gels. *LWT – Food Science and Technology*. 2014;56(1):93–100. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.10.043>
32. Хлыстов И. А., Штин Т. Н., Гурвич В. Б., Кузьмина Е. А., Бугаева А. В. и др. Комплексообразующая способность органических соединений и их влияние на организм человека (обзор). *Гигиена и санитария*. 2020. Т. 99 № 12. С. 1365–1369. [Hlystov IA, Shtin TN, Gurvich VB, Kuz'mina EA, Bugayeva AV, *et al.* Complexing ability of organic compounds and their influence on the human body (review). *Hygiene and Sanitation*. 2020;99(12):1365–1369. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-12-1365-1369>
33. Викторова Е. П., Лисовая Е. В., Сverdlichenko А. В., Воробьева О. В. Актуальные вопросы применения комплексов микронутриентов для обогащения продуктов питания. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2021. № 1. С. 89–97. [Viktorova EP, Lisovaya EV, Sverdlichenko AV, Vorobyova OV. Topical issues of using micronutrient complexes for food fortification. *Technologies for the food and processing industry of AIC – Healthy food*. 2021;(1):89–97. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-1-89-97>
34. Громов Д. А., Борисова А. В., Бахареv В. В. Пищевые аллергены и способы получения гипоаллергенных пищевых продуктов. *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 2. С. 232–247. [Gromov DA, Borisova AV, Bakharev VV. Food allergens and methods for producing hypoallergenic foods. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):232–247. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247>
35. Щёкотова А. В., Атласова Д. В. Изучение биологических взаимоотношений и биохимических свойств пробиотических микроорганизмов. *Вестник ВСГУТУ*. 2022. № 3. С. 36–45. [Shchekotova AV, Atlasova DV. Study of biological relationships and biochemical properties of probiotic microorganisms. *ESSUTM Bulletin*. 2022;(3):36–45. (In Russ.)] https://doi.org/10.53980/24131997_2022_3_36
36. Грабеклис В. В., Делюкина О. В., Савко С. А. Взаимодействие эссенциальных элементов и кишечной микробиоты: обзор литературы. *Микроэлементы в медицине*. 2023. Т. 24. № 3. С. 12–21. [Grabeklis VV, Delyukina OV, Savko SA. Interaction of essential elements and gut microbiota: A literature review. *Trace elements in medicine*. 2023;24(3):12–21. (In Russ.)] <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2023-24-3-12-21>
37. Bermúdez-Humarán LG, Chassaing B, Langella P. Exploring the interaction and impact of probiotic and commensal bacteria on vitamins, minerals and short chain fatty acids metabolism. *Microbial Cell Factories*. 2024;23(1):172. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02449-3>