

# Выделение белково-минеральных концентратов при электроактивации молочной сыворотки с низким содержанием белка

И. В. Паладий

*Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет,  
г. Кишинев, MD-2028, Молдова, e-mail: [irina.paladii@ifa.usm.md](mailto:irina.paladii@ifa.usm.md), [paladii-irina@mail.ru](mailto:paladii-irina@mail.ru)*

Поступила в редакцию 19.06.2023

После доработки 29.01.2024

Принята к публикации 05.02.2024

Представлен метод обработки молочной сыворотки с низким содержанием белка при электроактивации, проведенной в электролизерах с разным соотношением объема обрабатываемой сыворотки к поверхности электрода (катода), разной геометрической формы и разными расстояниями между электродами и мембраной, влияющие на удельные энергозатраты на единицу объема. Анализируется выделение сывороточного белка в зависимости от основных параметров, характеризующих электроактивацию, с целью оптимизации технических характеристик электролизеров.

*Ключевые слова:* вторичные молочные продукты, сыворотки, белки, электроактивация, электролизеры, конструктивно-геометрические параметры

УДК 637.344.2 (637.024), 637.344.8

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.114>

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка безотходных процессов и технологий переработки молочной сыворотки (МС) предпринимается для получения полезных продуктов и исключения отходов, воздействующих на окружающую среду, эффективного развития экономической, промышленной, сельскохозяйственной деятельности и повышения качества жизни [1, 2].

Увеличение потребностей в продуктах питания порождает проблему создания новых процессов и технологий переработки с максимальным использованием как сырья, так и вторичных продуктов с учетом пересмотра использования отходов. Такая тенденция прослеживается в молокоперерабатывающей промышленности с применением вторичных молочных продуктов для создания безотходных технологий переработки МС [3–5].

Молоко и молочные продукты играют важную роль в обеспечении питания, являясь одним из самых доступных источников животных белков, несмотря на некоторые доводы о вреде молока [6, 7]. Питательные свойства молока обусловлены содержанием углеводов (лактоза), белка и внушительного количества минералов, чрезвычайно полезных для костной ткани, обладающих вместе с другими компонентами жизненно важными биологическими свойствами для организма человека: эти вещества переходят в

большом объеме во вторичные молочные продукты [8–10].

За последние 50 лет проанализированы возможности использования МС, тем не менее около 30–50% МС до сих пор выливается в сточные воды, создавая большие экологические проблемы [11–13].

МС разных видов зависит от первичной обработки молока и представляет собой ценный источник функциональных и питательных белков.

Вода в сыворотке составляет 93–95% и по формам связи бывает в свободном, физико-химическом и химическом состоянии. МС содержит около 250 веществ, которые образуют сухой остаток от МС 7–8% и составляют примерно 50–70% от массы исходного молока [14].

Лактоза, основной углевод молока, наиболее ценные белковые фракции, а именно сывороточные белки МС ( $\alpha$ -лактальбумины,  $\beta$ -лактоглобулины, иммуноглобулины и др.), а также ряд макро- и микроэлементов, липидов, витаминов и других ингредиентов при первичной обработке молока почти полностью переходят в МС (рис. 1) [11, 15].

Сывороточные белки структурно аналогичны белкам крови, одна из основных их функций – иммунная, они более диспергированы, чем в молоке, и благотворно влияют на биохимические процессы пищеварения [16–23].

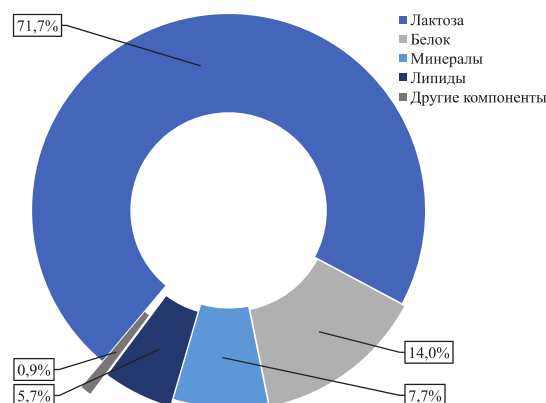


Рис 1. Химический состав исходной молочной сыворотки.

Аминокислоты в пищевых продуктах имеют значительную биологическую ценность. Аминокислотный состав сывороточных белков наиболее близок к мышечной ткани человека, а по составу незаменимых аминокислот превосходит по содержанию многие белки животного и растительного происхождения [22, 24].

Сывороточные белки имеют самую высокую скорость расщепления в процессе пищеварения среди всех цельных белков. Концентрация аминокислот и пептидов в крови резко возрастает уже в первый час после приема пищевых продуктов на основе белков молочной сыворотки [25, 26].

Известны различные способы переработки вторичных молочных продуктов с получением белковых концентратов, успешно применяемых в различных пищевых и фармацевтических добавках в качестве биологически активных веществ. Особый интерес представляет использование сывороточных белков, полученных из молочной сыворотки. Но их использование требует соблюдения определенных технологических режимов, обеспечивающих высокую степень чистоты и нативности [27–31].

Однако многие промышленные предприятия считают сыворотку отходами и выливают ее в сточные воды, которые при неправильной очистке могут вызвать серьезные экологические проблемы [32]. Текущая национальная и международная ситуации в отношении создания экологических технологий переработки вторичных молочных продуктов требует [33]: разработки безотходных технологий с использованием всех фракций; поиска современных и эффективных новых технологических процессов, в том числе электрофизических; определения функциональных параметров процессов; снижения энергозатрат, необходимых для технологического процесса.

Содержание сухих веществ в сыворотке, благодаря ее ценным биологическим и питательным свойствам, вызывает повышенный интерес к их использованию, как в пищевой, так

и в фармацевтической промышленности [34–39]. В связи с высоким потенциалом молочной сыворотки как ценного сырья для получения пищевых и биологически активных веществ с добавленной стоимостью все более актуальной становится разработка новых технологий повторного использования побочных продуктов молочной промышленности. Передовые технологии, такие как использование мембран (обратный осмос, диафильтрация, макро- и микрофильтрация, ультрафильтрация и нанофильтрация), биоферментация, гидролиз, электродиализ, электроактивация, позволили повторно использовать сыворотку [39, 40].

Анализ технологических процессов, связанных с применением электроактивации, предусматривает оптимизацию процесса без непосредственного использования химических реагентов, низкую температуру обработки и низкое энергопотребление.

Переработка вторичных молочных продуктов, основанная на электроактивации, представляет один из оптимальных и перспективных методов обработки МС и описана разными группами исследователей [41, 42].

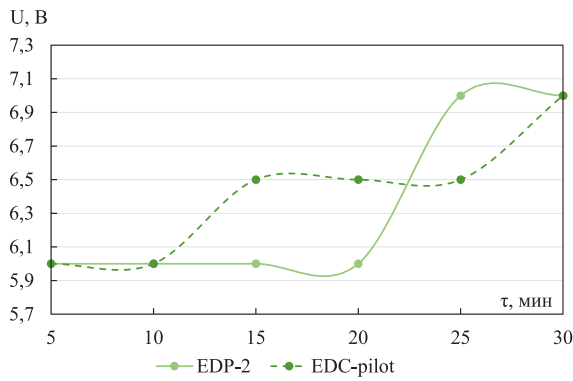
Необходимость переработки МС, полученной при первичной обработке молока, и, соответственно, производство различных молочных продуктов диктуются, в первую очередь, использованием сухого вещества и белка, перешедшими в сыворотку.

Целью данной работы является исследование выделения белково-минерального концентрата (БМК) из МС с низким содержанием белка.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

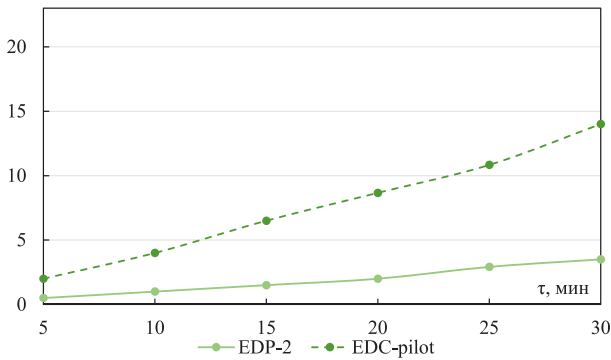
Электроактивация различных видов МС демонстрирует особенности выделения белково-минеральных концентратов в зависимости от исходного содержания сывороточных белков в МС в результате первичной обработки молока.

Кишиневским молочным комбинатом ЛС были предоставлены три вида молочной сыворотки, полученной после выработки:



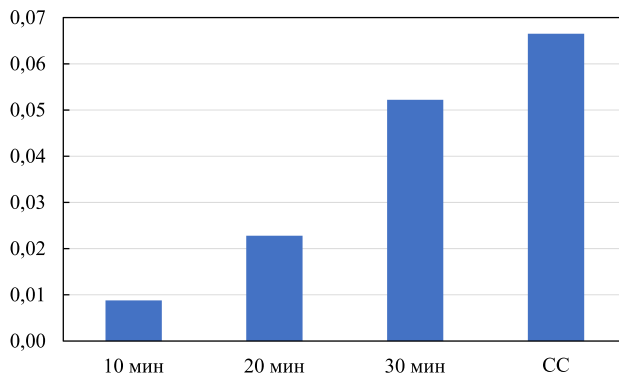
**Рис. 2.** Изменение напряжения в электролизерах EDP-2 и EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

A, Вт·ч



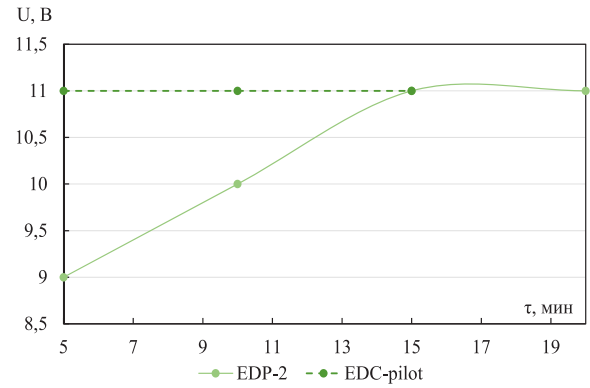
**Рис. 4.** Изменение энергозатрат  $A$ , (Вт·ч) в электролизерах EDP-2 и EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

A/V, Вт·ч/мл



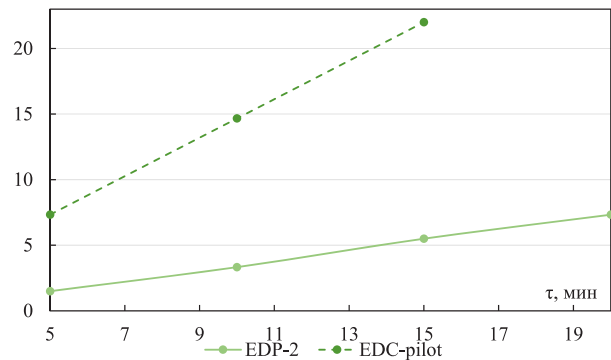
**Рис. 6.** Изменение удельного расхода энергии на единицу объема,  $A/V$  (Вт·ч/мл), в электролизере EDP-2 при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

зерненого творога «Gräuncior»; творога 2% жирности и творожной массы 18% жирности. В соответствии с исходным содержанием белка сыворотки были названы: молочная сыворотка с высоким содержанием белка – 33,98 мг/мл (полученная после изготовления зерненого творога «Gräuncior»); молочная сыворотка со средним содержанием белка – 27,26 мг/мл (полученная после изготовления творога 2% жирности) и молочная сыворотка с низким содержанием белка – 19,61 мг/мл (полученная после изготовления творожного продукта 18% жирности). Исследования выделения БМК из МС



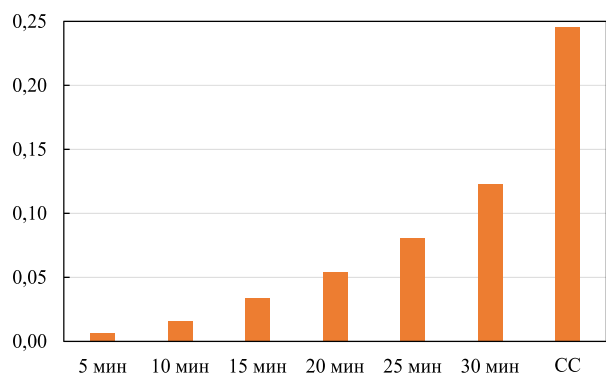
**Рис. 3.** Изменение напряжения в электролизерах EDP-2 и EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .

A, Вт·ч



**Рис. 5.** Изменение энергозатрат  $A$ , (Вт·ч) в электролизерах EDP-2 и EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .

A/V, Вт·ч/мл



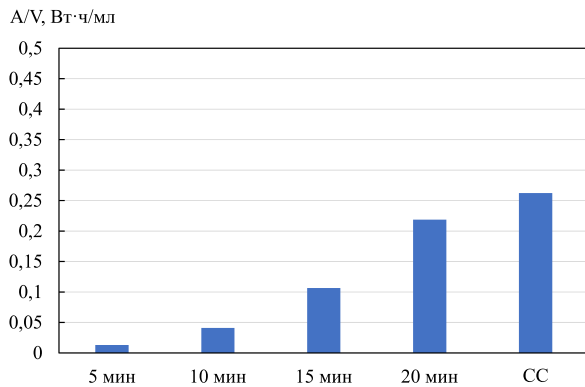
**Рис. 7.** Изменение удельного расхода энергии на единицу объема,  $A/V$  (Вт·ч/мл), в электролизере EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

с высоким и средним содержанием сывороточных белков были описаны в [43, 44].

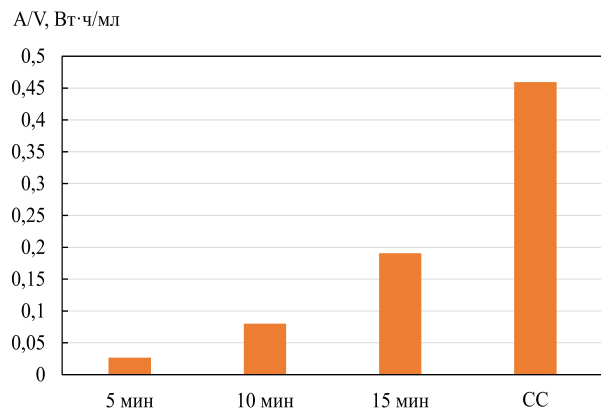
В данной работе представлены результаты извлечения сывороточных белков в БМК из МС с низким содержанием белка (НСБ), определяемой как МС НСБ.

Электроактивация МС НСБ вызывает определенные особенности при ее переработке из-за больших количеств МС, производимой на предприятиях, и технологии получения творожного продукта 18% жирности.

Технические требования к обеспечению управления и контроля электроактивации различных видов МС приведены в работе [42].



**Рис. 8.** Изменение удельного расхода энергии на единицу объема,  $A/V$  (Вт·ч/мл), в электролизере EDP-2 при электроактивации МС НСБ,  $j = 20$  мА/см<sup>2</sup>.



**Рис. 9.** Изменение удельного расхода энергии на единицу объема,  $A/V$  (Вт·ч/мл), в электролизере EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 20$  мА/см<sup>2</sup>.

Разработка электролизеров различной геометрической и конструктивной конфигурации, соответствующих определенным особенностям и технологическим требованиям электроактивации вторичных молочных продуктов, направлена на выделение БМК и одновременную изомеризацию лактозы в лактулозу, содержащуюся в депротеинизированной сыворотке (ДС), что основано на понимании физико-химических и биохимических процессов, происходящих при прохождении электрического тока через дисперсную среду со сложной биологической структурой, такую как сыворотка.

В приведенных исследованиях были использованы два вида электролизеров (условно называемые EDP-2 и EDC-pilot) с определенными техническими параметрами, позволяющими осуществлять безотходную переработку МС НСБ.

Конструктивные особенности использованных электролизеров, методика и режимы обработки МС, содержание белка детально описаны в [42–44].

Степень выделения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) рассчитывали по разнице между содержанием белка в исходной МС и ДС [45].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Электроактивация МС НСБ была направлена на снижение удельного расхода энергии и объемной плотности тока за счет увеличения проводимости или уменьшения сопротивления обрабатываемой среды, обусловленных еще и повышенным содержанием кальция при получении творожного продукта 18% жирности.

Основными электрическими параметрами при электроактивации МС НСБ являются плотность электрического тока ( $j$ ) и величина напряжения ( $U$ ), которые характеризуют проводимость обрабатываемой среды.

Электроактивацию МС НСБ проводили при плотности электрического тока 10 и/или 20 мА/см<sup>2</sup>, которая в процессе обработки поддерживается постоянной.

Изменение значений напряжения во время электроактивации обусловлено электропроводностью обрабатываемой среды на протяжении всей длительности обработки МС НСБ в электролизерах EDP-2 и EDC-pilot (рис. 2, 3). Низкие значения напряженности, в отличие от [43, 44], обусловлены еще и повышенным содержанием кальция при получении творожного продукта 18% жирности, что приводит к увеличению проводимости среды при электроактивации.

Энергозатраты  $A$ , (Вт·ч) при электроактивации МС НСБ зависят от геометрической формы электролизеров, симметрии между катодной и анодной камерами, объема перерабатываемой сыворотки (рис. 4, 5).

Наименьшие удельные энергозатраты зарегистрированы в случае электролизера EDP-2 при  $j = 10$  мА/см<sup>2</sup>. Конфигурация и асимметрия катодной и анодной камер для МС НСБ среди исследованных МС обеспечивает самые низкие значения, обусловленные большим потоком ионов кальция из анодной камеры и низким содержанием белка в МС. По-видимому, происходят интенсивные процессы образования БМК посредством высаливания белков МС (рис. 6–9).

Электролизер EDC-pilot был оптимизирован по конструктивным параметрам с учетом повышения эффективности электроактивации, в частности, по снижению удельных энергозатрат. Эти технические усовершенствования эффективнее при обработке МС в непрерывном режиме и в промышленных условиях.

Электроактивация МС НСБ при разных плотностях тока в электролизере EDP-2, который имеет асимметричные катодную и анодную камеры в форме параллелепипеда, показывает

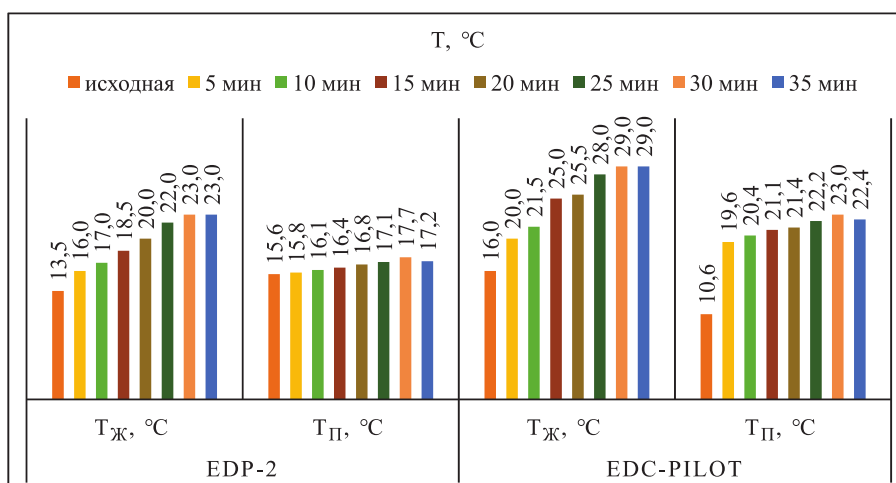


Рис. 10. Изменение температуры жидкой ( $T_{\text{ж}}$ , °C) и пенной ( $T_{\text{п}}$ , °C) фаз при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

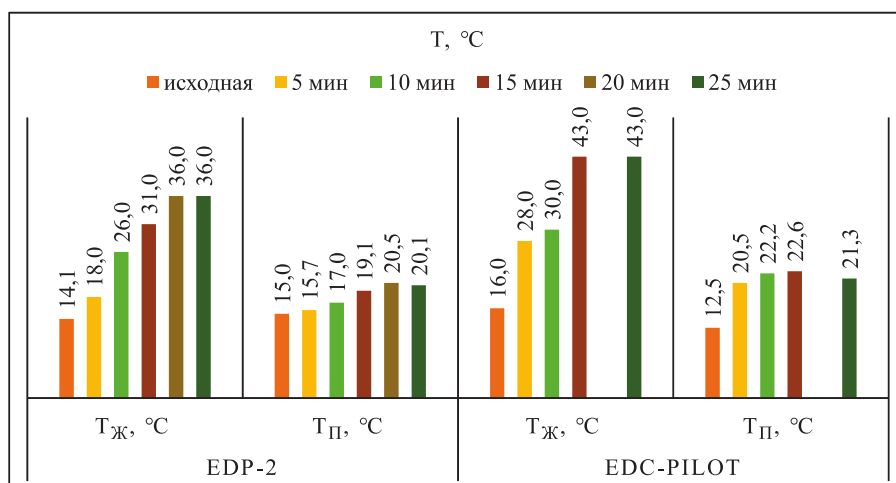


Рис. 11. Изменение температуры жидкой ( $T_{\text{ж}}$ , °C) и пенной ( $T_{\text{п}}$ , °C) фаз при электроактивации МС НСБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .

более низкие значения удельных энергозатрат по сравнению с EDC-pilot.

EDC-pilot позволяет исключить неэффективные «мертвые» зоны, что более эффективно при проточном режиме обработки сыворотки и адаптации данного электролизера к промышленным условиям переработки МС.

При фракционировании белков МС НСБ и их выделении в БМК следует разрабатывать электролизеры с исключением неэффективных зон, сохраняя асимметрию катодной и анодной камер, периодический режим подачи МС, что является характерной особенностью для МС НСБ.

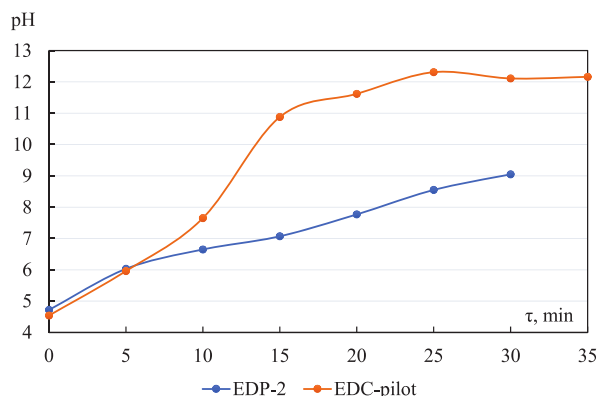
Термическая денатурация сывороточных белков МС составляет 55–60 °C, и при электроактивации требуется соблюдение условий управления процессом для исключения денатурации, вызванной джоулевым нагревом, зависящим от проводимости обрабатываемой среды. Необходимым условием для снижения сопротивления системы является обеспечение наличия носителей заряда в зависимости от сухого состава МС, от используемого вида, снижения сопротивления мембраны, соблюдения оптимального расстояния между электродами и

электродами и мембраной, состава и содержания вторичной жидкости (анодной).

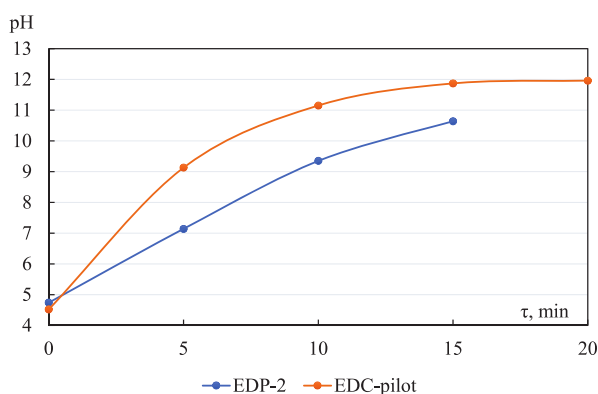
Электроактивация МС НСБ в разных электролизерах позволяет выделить две фракции: БМК, собирающийся в виде пены и в дальнейшем разделяющийся центрифугированием с получением концентрата, и ДС. Обработка в катодной камере происходит с образованием двух фаз: пенной и жидкой, что позволяет регистрировать соответственно температуру  $T_{\text{п}}$ , °C и  $T_{\text{ж}}$ , °C.

Изменение температуры жидкой и пенной фаз свидетельствует о большем ее росте при обработке в электролизере EDC-pilot в жидкой фазе по сравнению с EDP-2, что обусловлено электрогидродинамическими процессами, определяющимися конструктивно-геометрическими параметрами, содержанием сухих веществ в МС НСБ и анодной жидкости и способствующими снижению общего омического сопротивления и, соответственно, джоулевого нагрева (рис. 10).

Изменение температуры жидкой и пенной фаз при электроактивации МС НСБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$  сохраняет тот же характер роста температуры, обусловленный теми же факторами и не



**Рис. 12.** Изменение pH в электролизерах EDP-2, EDC-pilot, при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ мА/см}^2$ .



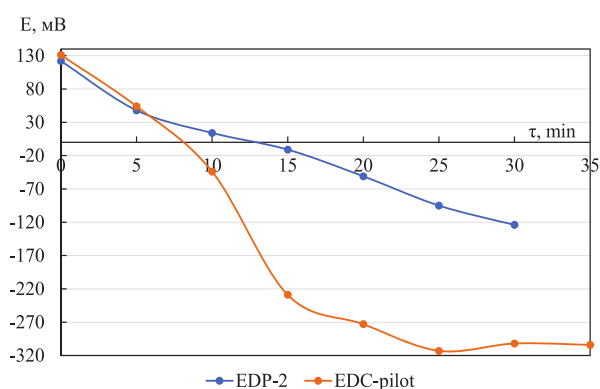
**Рис. 14.** Изменение pH в электролизерах EDP-2, EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 20 \text{ мА/см}^2$ .

превышает предельную температуру денатурации сывороточных белков, выделенных в БМК (рис. 11).

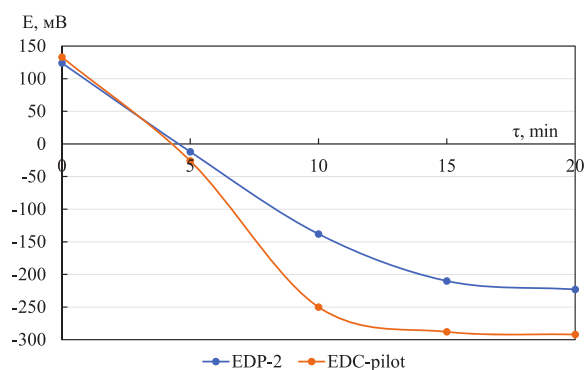
Электроактивация сыворотки в электролизерах с разными конструктивными/геометрическими параметрами не допускает термической денатурации сывороточных белков МС при их выделении в БМК и характеризуется изменением основных физико-химических параметров — значений pH и окислительно-восстановительного потенциала  $E$ , (мВ), инициируемых реакциями, присутщими диссоциации воды в ячейках катода и анода на поверхности электродов, что характеризует физико-химические и биохимические изменения в сыворотке.

Катодная камера играет роль основной ячейки, где обрабатывается МС, в то время как анодная второстепенная ячейка предназначена, в первую очередь, поддерживать проводимость системы.

В глобулярной структуре сывороточных белков МС поляризованные гидрофильные радикалы аминокислот ориентированы к поверхности глобул, что позволяет им взаимодействовать с растворителем, а гидрофобные (неполярные) радикалы ориентированы к центру глобулы.



**Рис. 13.** Изменение окислительно-восстановительного потенциала  $E$ , мВ, в электролизерах EDP-2, EDC-pilot, при электроактивации МС НСБ,  $j = 10 \text{ мА/см}^2$ .



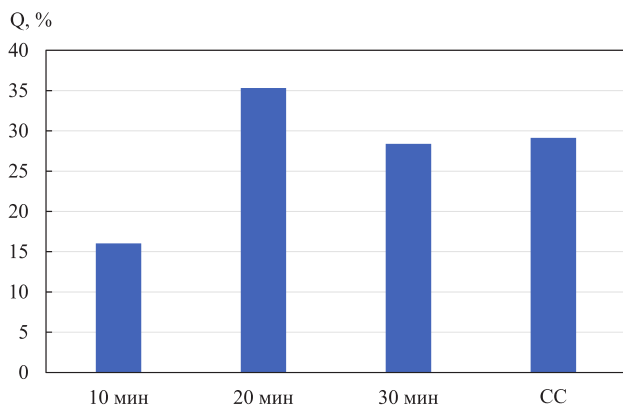
**Рис. 15.** Изменение окислительно-восстановительного потенциала  $E$ , мВ, в электролизерах EDP-2, EDC-pilot при электроактивации МС НСБ,  $j = 20 \text{ мА/см}^2$ .

Молекулы белка в растворах окружены гидратирующей пленкой, которая ориентирована по периметру гидрофильных диполей воды. Белки в растворах сохраняют нативное состояние благодаря поддерживающим факторам, которые состоят из заряда молекул и гидратирующей пленки вокруг нее, что предотвращает их слипание. При устранении этих факторов происходит коагуляция и осаждение белков.

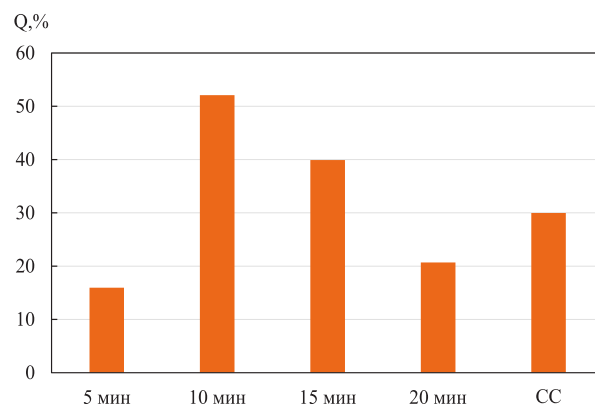
При электроактивации происходит диссоциация воды на электродах, нарушается гидратная оболочка молекул белков, что приводит к осаждению с одновременной коагуляцией белковых молекул и вместе с ионами щелочноземельных элементов они выделяются в виде БМК.

Под действием электрического тока активируются межмолекулярные связи и, соответственно, ионные радикалы аминокислот, которые способствуют множественным меж- и внутримолекулярным взаимодействиям, что приводит к агрегации и перераспределению белковых молекул.

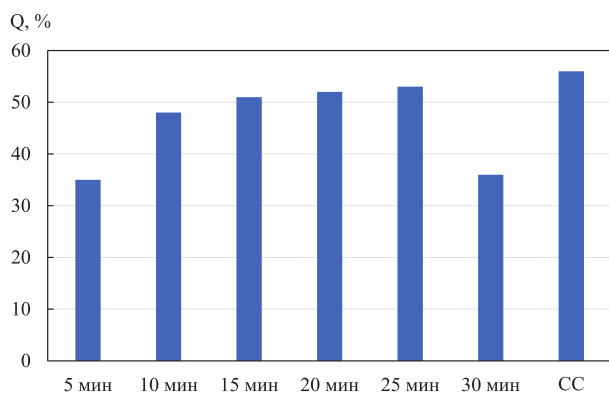
Образование гидроксидионов при диссоциации воды на катоде, как следствие электроактивации, придающих среде щелочные характеристики, и выделение газообразного водорода способствуют ионной флотации,



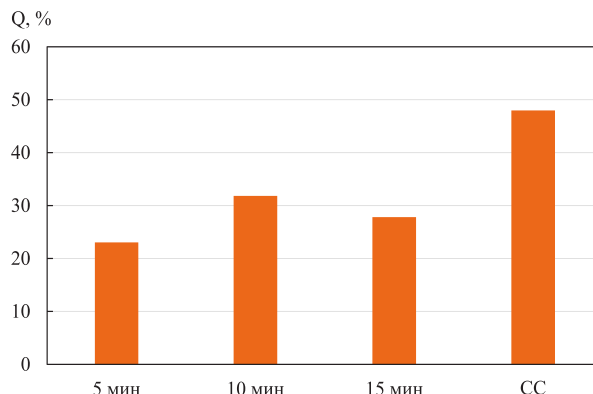
**Рис. 16.** Изменение степени извлечения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) при электроактивации МС НСБ в электролизере EDP-2,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ , CC – содержание МС в катодной камере.



**Рис. 17.** Изменение степени извлечения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) при электроактивации МС НСБ в электролизере EDP-2,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ , CC – содержание МС в катодной камере.



**Рис. 18.** Изменение степени извлечения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) при электроактивации МС НСБ в электролизере EDC-pilot,  $j = 10 \text{ A/cm}^2$ , CC – содержание МС в катодной камере.



**Рис. 19.** Изменение степени извлечения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) при электроактивации МС НСБ в электролизере EDC-pilot,  $j = 20 \text{ A/cm}^2$ , CC – содержание МС в катодной камере.

создавая пенную фазу наряду с последствиями высаливания белков из-за присутствия большого количества ионов минералов, мигрирующих через гетерогенную катионную мембрану МК-40 из анодной камеры. Процесс интенсифицируется, и «развертывание» белковых молекул и выявление еще большего количества активных аминокислот придадут щелочные свойства обрабатываемой МС и приводят к повышению pH в катодной камере. Одновременно белковые молекулы проходят через их изоэлектрические точки, осаждаются. Выявленные восстановительные реакции, происходящие в катодной камере, характеризуются окислительно-восстановительным потенциалом  $E$  (мВ).

Переход аквакомплексов, где в качестве лигандов служат поляризованные молекулы воды, в гидрокомплексы, где лигандами служат гидроксиды, отмечено в [46].

Белковый состав МС, геометрическая форма и конструктивные параметры исследуемых электролизеров, режимы обработки и соответственно объем обрабатываемой МС влияют на процесс перехода аквакомплексов в гидрокомплексы, и этот переход свидетельствует

о максимальном выделении сывороточных белков в БМК.

Электроактивация МС НСБ в первую очередь зависит от исходного содержания сывороточных белков.

Увеличение pH носит очевидный характер перехода аквакомплексов в гидрокомплексы при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  в EDC-pilot и интенсивно отрицательных значениях окислительно-восстановительного потенциала, свидетельствующих об усиленном образовании активных восстановителей (рис. 12, 13).

Обработка МС НСБ в EDP-2 в форме параллелепипеда, где камеры катода и анода асимметричны, свидетельствует о медленном переходе в щелочную область обработки и, соответственно, слабо отрицательных значениях окислительно-восстановительного потенциала. Это, возможно, связано со значительно меньшим перерабатываемым объемом в EDP-2 по сравнению с EDC-pilot, а также с меньшим количеством ионов кальция, имеющих возможность мигрировать из анодной камеры через гетерогенную мембрану МК-40 из-за ограниченной поверхности мембраны, и, соответственно, со снижением скорости

высаливания белков при образовании белковых концентратов.

Рост рН и снижение окислительно-восстановительного потенциала при электроактивации МС НСБ при  $j = 20 \text{ мА/см}^2$  сохраняются, как и при  $10 \text{ мА/см}^2$ , но процесс происходит вдвое быстрее и интенсивнее и практически с первых минут начинается образование гидрокомплексов (рис. 14, 15).

Обработка МС НСБ в EDC-pilot, оптимизированном по техническим параметрам, в первую очередь для исключения «мертвых» зон, сохраняет классический характер перехода аквакомплексов в гидрокомплексы и выраженные восстановительные реакции при электроактивации.

Изменение степени выделения сывороточного белка в БМК при электроактивации МС НСБ при плотностях электрического тока  $j = 10$  и  $20 \text{ мА/см}^2$  в электролизере EDP-2 минимальное по сравнению с другими видами сыворотки из-за низкого исходного содержания белка (рис. 16, 17) [43, 44].

Изменение степени выделения сывороточного белка в БМК при электроактивации МС НСБ при  $j = 10$  и  $20 \text{ мА/см}^2$  в электролизере EDC-pilot отличается кардинально от обработки в электролизере EDP-2. При  $j = 10 \text{ мА/см}^2$  выделение сывороточных белков больше практически в два раза по сравнению с обработкой при  $j = 20 \text{ мА/см}^2$  (рис. 18, 19), что указывает на рациональность технических модернизаций электролизеров, а именно при использовании полуцилиндрического корпуса исключаются «мертвые», нефункциональные зоны, а это позволяет увеличить в два раза выделение сывороточных белков в БМК при уменьшении удельных энергозатрат в два раза.

Извлечение сывороточных белков в БМК при электроактивации в электролизерах с различными конструктивно-геометрическими параметрами зависит от вида МС и обусловлено, в первую очередь, свойствами каждой отдельной фракции и ее поведением при электрохимической активации, а также исходным содержанием сухих веществ, особенно белкового состава, выбором режимов обработки, электрических, тепловых, физико-химических параметров, обозначающим индивидуальный подход к виду сыворотки в зависимости от исходного содержания сухих веществ и сывороточных белков, что требует установления технических и технологических условий обработки.

Важную роль играет корректировка технико-технологических параметров в соответствии с характеристиками удельных энергозатрат на единицу объема, которые определяют эффектив-

ность и экономичность электроактивации различных видов вторичных молочных продуктов.

## ВЫВОДЫ

Электроактивация молочной сыворотки МС НСБ при плотностях тока  $j = 10$  и  $20 \text{ мА/см}^2$  в электролизерах различной конструктивной/геометрической конфигурации позволила сформулировать следующие выводы:

1. Показано, что геометрические параметры, объем переработанной сыворотки и соотношение обрабатываемого объема сыворотки к поверхности электрода, расстояние между электродами и электродами и мембраной, плотность электрического тока, сухой состав исходной молочной сыворотки, объем вторичной жидкости (анодной) влияют на степень выделения сывороточных белков в БМК.

2. Установлено, что при электроактивации МС НСБ температурный порог денатурации сывороточных белков не должен превышать допустимых пределов –  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , что указывает на качество БМК.

3. Величина рН и окислительно-восстановительный потенциал  $E$ , (мВ) при электроактивации МС НСБ влияют на физико-химические и биохимические превращения основного состава МС, процесс сопровождается переходом аквакомплексов, где лигандами служат поляризованные молекулы воды, в гидрокомплексы, имеющие в качестве лигандов гидроксильные ионы.

4. Снижение окислительно-восстановительного потенциала  $E$ , (мВ) свидетельствует о скорости образования активных восстановителей, а также о многократных превращениях компонентов сыворотки, в первую очередь белковых фракций, а также о состоянии активации аминокислот.

5. Максимальная степень извлечения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) при электроактивации МС НСБ составляет около 56% в EDC-pilot,  $j = 10 \text{ мА/см}^2$  при значительно пониженных энергетических затратах.

6. При периодическом режиме подачи МС в электролизерах, предусматривающем фракционирование белков МС НСБ и их выделение в БМК, следует использовать электролизеры, обеспечивающие исключение неэффективных зон, сохраняя асимметрию катодной и анодной камер.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.06 (2020–2023) «Интенсификация



процессов переноса и обработки в электрических, электромагнитных, кавитационных полях; практичность».

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у нее отсутствует конфликт интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Zandona, E., Blažić, M. and Režek Jambrak, A., Whey utilization: Sustainable uses and environmental approach, *Food Technol. Biotechnol.*, 2021, vol. 59, no. 2, p. 147. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.6968>
- Addai, F.P., Lin, F., Wang, T., Kosiba, A.A., et al., Technical integrative approaches to cheese whey valorization towards sustainable environment, *Food Funct.*, 2020, vol. 11, no. 10, p. 8407. <https://doi.org/10.1039/d0fo01484b>
- Papaioannou, E.H., Mazzei, R., Bazzarelli, F., Piacentini, E., et al., Agri-food industry waste as resource of chemicals: the role of membrane technology in their sustainable recycling, *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 3, p. 1483. <https://doi.org/10.3390/su14031483>
- Knorr, D. and Augustin, M.A., From value chains to food webs: The quest for lasting food systems, *Trends Food Sci. Technol.*, 2021, vol. 110, p. 812. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.037>
- Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E. and Hebshy, E., Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives, *Int. J. Dairy Technol.*, 2023, vol. 76, no. 2, p. 291. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>
- Visioli, F. and Strata, A., Milk, dairy products, and their functional effects in humans: a narrative review of recent evidence, *Adv. Nutr.*, 2014, vol. 5, no. 2, p. 131. <https://doi.org/10.3945/an.113.005025>
- Thorning, T. K., Raben, A., Tholstrup, T., Soedamah-Muthu, S.S., et al., Milk and dairy products: good or bad for human health? An assessment of the totality of scientific evidence, *Food Nutr. Res.*, 2016, vol. 60, art. ID, 32527. <https://doi.org/10.3402/fnr.v60.32527>
- Bu, T., Zheng, J., Liu, L., Li, S., et al., Milk proteins and their derived peptides on bone health: Biological functions, mechanisms, and prospects, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2021, vol. 20, no. 2, p. 2234. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12707>
- Wadolowska, L., Sobas, K., Szczepanska, J.W., Slowinska, M.A., et al., Dairy products, dietary calcium and bone health: possibility of prevention of osteoporosis in women: the Polish experience, *Nutrients*, 2013, vol. 5, no. 7, p. 2684. <https://doi.org/10.3390/nu5072684>
- Caballero, A., Caballero, P., Leon, F., Rodríguez-Morgado, B., et al., Conversion of whey into value-added products through fermentation and membrane fractionation, *Water*, 2021, vol. 13, no. 12, art. ID 1623. <https://doi.org/10.3390/w13121623>
- Tsermoula, P., Khakimov, B., Nielsen, J.H. and Engelsen, S.B., WHEY – The waste-stream that became more valuable than the food product, *Trends Food Sci. Technol.*, 2021, vol. 118, Part A, p. 230. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.025>
- Israni, N., Venkatachalam, P., Gajaraj, B., Varalakshmi, K.N., et al., Whey valorization for sustainable polyhydroxyalkanoate production by *Bacillus megaterium*: Production, characterization and in vitro biocompatibility evaluation, *J. Environ. Manag.*, 2020, vol. 255, art. ID 109884. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109884>
- Bintsis, T. and Papademas, P., Sustainable approaches in whey cheese production: A review, *Dairy*, 2023, vol. 4, no. 2, p. 249. <https://doi.org/10.3390/dairy4020018>
- Paladii, I.V., Vrabie, E.G., Sprinchan, K.G. and Bologa, M.K., Part 1: Classification, composition, properties, derivatives, and application, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, p. 579. <https://doi.org/10.3103/S1068375521050112>
- Kazimierowicz, J., Zieliński, M., Bartkowska, I. and Dębowski, M., Effect of acid whey pretreatment using ultrasonic disintegration on the removal of organic compounds and anaerobic digestion efficiency, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, art. ID 11362. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811362>
- Almeida, C.C., Monteiro, M.L., Costa-Lima, B.R., Alvares, T.D., et al., In vitro digestibility of commercial whey protein supplements, *LWT*, 2015, vol. 61, no. 1, p. 7. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.038>
- León-López, A., Pérez-Marroquín, X.A., Estrada-Fernández, A.G., Campos-Lozada, G., et al., Milk whey hydrolysates as high value-added natural polymers: functional properties and applications, *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 6, art. ID 1258. <https://doi.org/10.3390/polym14061258>
- Храмцов, А.Г., Василисин, С.В., Рябцева, С.А., Воротникова, Т.С., *Технология продуктов из вторичного молочного сырья*. Санкт-Петербург: ООО Изд. ГИОРД, 2009. 424 с.
- Ashaolu, T.J. and Ashaolu, J.O., Bioactivity of whey peptides, *Int. J. Sci. Adv. res.*, 2020, vol. 1, no. 1, p. 10. <https://doi.org/10.51542/ijscia.v1i1.4>
- Nishanthi, M., Vasiljevic, T. and Chandrapala, J., Properties of whey proteins obtained from different whey streams, *Int. Dairy J.*, 2017, vol. 66, p. 76. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.11.009>
- Nishanthi, M., Chandrapala, J. and Vasiljevic, T., Compositional and structural properties of whey proteins of sweet, acid and salty whey concentrates and their respective spray dried powders, *Int. Dairy J.*, 2017, vol. 74, p. 49. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.01.002>

22. Bleoussi, R., Konfo, C.T., Tchekessi, C.C., Sachi, P., et al., Nutritional quality and use of whey in human food for its valorization, *World J. Adv. Res. Rev.*, 2020, vol. 8, no. 1, p. 284. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.8.1.0356>
23. Macwan, S.R., Dabhi, B.K., Parmar, S.C. and Aparnathi, K.D., Whey and its utilization, *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2016, vol. 5, no. 8, p. 134. doi: <https://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.508.016>.
24. Naidoo, K., Naidoo, R. and Bangalee, V., Understanding the amino acid profile of whey protein products, *Glob. J. Health Sci.*, 2018, vol. 10, no. 9, p. 45. <https://doi.org/10.5539/gjhs.v10n9p45>
25. Corrochano, A.R., Arranz, E., De Noni, I., Stuknytė, M., et al., Intestinal health benefits of bovine whey proteins after simulated gastrointestinal digestion, *J. Funct. Foods*, 2018, vol. 49, p. 526. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.08.043>
26. Inglingstad, R., Devold, T.G., Eriksen, E.K., Holm, H., et al., Comparison of the digestion of caseins and whey proteins in equine, bovine, caprine and human milks by human gastrointestinal enzymes, *Dairy Sci. Technol.*, 2010, vol. 90, p. 549. <https://doi.org/10.1051/dst/2010018>
27. Fenelon, M.A., Hickey, R.M., Buggy, A.K., et al., Whey proteins in infant formula, *Whey Proteins*, 2019, p. 439. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812124-5.00013-8>
28. Pires, A.F., Marnotes, N.G., Rubio, O., García, A.C., et al., Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey, *Foods*, 2021, vol. 10, art. ID 1067. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>
29. Липатов, Н.Н., *Молочная промышленность XXI века: Обзорная информация*. М.: АгроНИИТЭИММП, 1989. 56 с.
30. Fox, P.F., Guinee, T.P., Cogan, T.M. and McSweeney, P.L.H., Whey and whey products. In: *Fundamentals of Cheese Science.*, Boston: Springer, 2017, p. 755. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9\\_22\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9_22_25)
31. Sharma, K. and Chauhan, E.S., Multifaceted whey protein: Its applications in food industry, *Int. J. Health Sci. Res.*, 2018, vol. 8, no. 10, p. 262.
32. Papademas, P. and Paschalia K., Technological utilization of whey towards sustainable exploitation, *Adv. Dairy Res.*, 2019, vol. 7, art ID 231. <https://doi.org/10.35248/2329-888X.19.7.231>
33. De Almeida, M.P.G., Mockaitis, G. and Weissbrodt, D.G., Got whey? The significance of cheese whey at the confluence of dairying, environmental impacts, energy and resource biorecovery, *The Evolving Scholar*, 2021, vol. 1. <https://doi.org/10.24404/5fdd3c22eaf7860008874c47>
34. Nahir, P. and Ami, R., Prospective utilization of valuable dairy by- product: whey, *Ann., Food Sci. Technol.*, 2019, vol. 20, no. 2, p. 260.
35. Shinde, G., Kumar, R., Chauhan, S., et al., Whey proteins: A potential ingredient for food industry – A review. *Asian J. Dairy & Food Res.*, 2018, vol. 37, no. 4, p. 283. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-1389>
36. Zhou, J., Liu, J. and Tang, X., Effects of whey and soy protein addition on bread rheological property of wheat flour, *J. Texture Stud.*, 2018, vol. 49, no. 1, p. 38. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12275>
37. Paul, S.K., Kulkarni, S.P. and Chauhan, R., Utilization of whey in bakery products-A review, *Indian J. Dairy Sci.*, 2022, vol. 75, no. 4, p. 297. <https://doi.org/10.33785/IJDS.2022.v75i04.001>.
38. Królczyk, J.B., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., Sołowiej, B.G., Use of whey and whey preparations in the food industry – A Review, *Polish J. Food Nutr. Sci.*, 2016, vol. 66, no. 3, p. 157. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>
39. Aslam, M., Khalid, A., Tahir, G. and Mukhtar, H., Recent developments in purification techniques for whey valorization, *J. Biomed. Res. Environ. Sci.*, 2021, vol. 2, no. 9, p. 876. <https://doi.org/10.37871/jbres1326>
40. Nath, A., Zin, M.M., Molnár, M.A., Bánvölgyi, S., et al., Membrane chromatography and fractionation of proteins from whey—a review, *Processes*, 2022, vol. 10, art. ID 1025. <https://doi.org/10.3390/pr10051025>
41. Kareb, O., Champagne, C., Jean, J., Goma, A., et al., Effect of electro-activated sweet whey on growth of *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, and *Streptococcus* strains under model growth conditions, *Food Res. Int.*, 2018, vol. 103, p. 316. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.060>
42. Vrabie, E., Bologa, M., Paladii, I., Stepurina, T., et al., Electrical processing of whey. Role of construction, technological and energy characteristics of reactors, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, p. 197.
43. Paladii, I., Vrabie, E., Vrabie, V., Bologa, M., et al., Electroactivation emerging method of processing of whey with high protein content, *Sci. Papers. Series D. Animal Sci.*, 2023, vol. 66, no.1, p. 465.
44. Paladii, I., Vrabie, E., Bologa, M.; Vrabie, V., et al., Electroactivation: An advanced method of processing of whey with medium protein content, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, no. 6, p. 824. <https://doi.org/10.3103/S1068375523060145>
45. Ressler, N., Gahkoff, M. and Fischinger, A., Improved method for determining serum protein concentration in the far ultraviolet, *Clin. Chem.*, 1976, vol. 22, no. 8, p. 1355.
46. Vrabie, E., Bologa, M., Stepurina, T., Bologa, A., et al., Peculiarities of the electric activation of whey, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, p. 66.

### Summary

The article presents a method for processing whey with a low protein content during electroactivation carried out in different electrolyzers with different ratios of the volume of whey processed to the surface of the electrode (cathode) different geometric shapes and different distances between the electrodes and the membrane, which affects specific energy consumption per unit volume. The recovery of whey proteins depending on the main parameters characterizing electroactivation to optimize the technical characteristics of electrolyzers is analyzed.

**Keywords:** secondary dairy products, whey, whey proteins, electroactivation, electrolyzers, constructive-geometrical parameters