Электроактивация молочной сыворотки в непрерывном режиме

И. В. Паладий*, Е. Г. Врабие, В. Г. Врабие, А. А. Поликарпов, Т. Г. Степурина, К. Г. Спринчан

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

Поступила в редакцию 10.11.2025
После доработки 17.12.2025
Принята к публикации 19.12.2025

Показано, что электроактивация молочной сыворотки (МС), проводимая в непрерывном режиме в электролизерах разной конструкции, является одним из важных этапов в цепочке разработки безотходной технологии выделения сывороточных белков в белково-минеральные концентраты. Выявлено, что способ подачи МС и анодной жидкости, конструкции электролизеров, вариация электрических и термических параметров, а также величин pH и окислительно-восстановительного потенциала и биохимических изменений сухого вещества и белкового состава являются главными звеньями в разработке технологии на производственном уровне. Установлено, что удельный расход энергии на единицу объема МС при обработке МС в электролизере с полуцилиндрическим корпусом EDC-3 значительно ниже, чем при электроактивации МС в EDP-2 с корпусом в виде параллелепипеда, что обусловлено большей емкостью электролизера и более высокой концентрацией ионов кальция, но выше в случае обработки МС в щелевом электролизере EDP-5 почти в два раза. Исследования особенностей изменения вышеуказанных параметров при электроактивации молочной сыворотки обусловили разработку щелевого электролизера с полуцилиндрическим корпусом для непрерывного режима обработки МС.

Ключевые слова: электроактивация, электролизеры, вторичные молочные продукты, сывороточные белки, конструктивно-геометрические параметры, молочная сыворотка

УДК 637.344.2 (637.024), 637.344.8
https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.6.47

ВВЕДЕНИЕ

Значимость факторов, влияющих на развитие молочной промышленности, обусловлена инновационными решениями, которые обеспечивают экономически выгодные технологии с максимальной экологической безопасностью. В контексте многоцелевой экономики и концепции устойчивого развития возникает необходимость решения экологических и социальных проблем [1, 2]. Это требует внедрения новых и инновационных технологий, обеспечивающих замкнутые циклы и безотходную обработку побочных продуктов/отходов и удовлетворяющих требования потребителей. Для этого необходимы обширные исследования по разработке конкретных действий, направленных на создание таких технологий [3, 4].

Разработка безотходных технологий переработки вторичных молочных продуктов, таких как молочная сыворотка (МС), и рациональное использование ее белкового состава – технически и технологически сложная проблема, решение которой становится все более востребованным, актуальным и перспективным, имеющим важное значение для всех стран [5, 6].

Переработка МС является многогранной и включает в себя различные методы и/или их комбинации, позволяющие выделить все ее фракции. Основными процессами и методами переработки МС являются: термические, химические, физико-химические, биотехнологические, электрофизические [7, 8].

Необходимость переработки отходов биологического происхождения, в том числе МС, которая после долгих споров стала классифицироваться как вторичный молочный продукт, получаемый при первичной переработке молока, обусловлена как высокой биологической ценностью сухого состава (включая сывороточные белки МС), так и необходимостью снижения загрязнения окружающей среды [9, 10].

Электрохимические методы переработки МС позволяют решить ряд экологических проблем, обеспечить защиту окружающей среды и осуществить мониторинг загрязнений, способствуя развитию альтернативных промышленных процессов. Электротехнологии являются одними из самых безвредных методов при переработке

дисперсных сред биологического происхождения [11, 12].

Электроактивация считается наиболее прогрессивным и экологичным методом, обеспечивающим исключение прямого использования химических реагентов, снижение выбросов в раствор, улучшение качества конечных продуктов, сокращение времени обработки, повышение эффективности и упрощение технологических процессов [12].

Переработка дисперсных сред, в частности вторичных пищевых продуктов (сыворотки, пахты и т.д.), электроактивацией представляет собой альтернативу традиционным методам и вызывает все больший интерес благодаря своей способности преобразовывать электрическую энергию в химическую [13]. Выделение сывороточных белков из различных видов МС обеспечивает сокращение вредного воздействия на окружающую среду за счет использования внутренних сил перерабатываемого продукта [14].

Содержание сухих веществ, особенно белка, в МС имеет большое значение благодаря ее функциональным свойствам, таким как растворимость, гелеобразование, эмульгирование, пенообразование, для разработки методов, способов/технологий повышения качества и рационального использования ее компонентов, а также для получения новых продуктов и организации замкнутого цикла процесса переработки [15].

Электроактивация молочной сыворотки в различных электролизерах позволяет разработать экологически чистый безотходный технологический процесс фракционирования сывороточных белков и их выделения в белково-минеральные концентраты (БМК). Процесс позволяет получить две основные фракции: белковые концентраты, обогащенные заранее определенными белковыми и минеральными фракциями, и одновременно депротеинизированную сыворотку (ДС), частично содержащую изомеризованную лактулозу, минеральные вещества, гидролизаты белков и аминокислоты (рис. 1) [16].

Электроактивация МС в периодическом и непрерывном режиме позволила понять суть процесса и исследовать выделение основных белковых фракций в БМК, влияние всех конструктивно-геометрических, электрических, термических, физико-химических и биохимических параметров на электрофракционирование молочной сыворотки для приспособления процесса к промышленным масштабам [17–20]. Это позволило найти пути для выполнения научных исследований, дающих «новую жизнь» отходам с помощью экологически чистых технологий, и показало целесообразность предлагаемого метода. В этом контексте цель работы – изучение электроактивации МС и вторичной жидкости в периодическом и непрерывном режиме в ранее разработанных диафрагменных электролизерах с различными геометрическими параметрами [21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Электроактивация МС в условиях непрерывного режима ее подачи, а также вторичной жидкости была использована для оптимизации процесса их переработки на основе исследований, проведенных в периодическом режиме, и дальнейшей адаптации этого метода к производственным условиям.

При первичной переработке молока получается огромное количество МС со средним содержанием белка (это сыворотка, получаемая после производства творога жирностью 2 и 5%). Этот вид молочной сыворотки (МС) был использован в дальнейших исследованиях.

Электроактивация МС в непрерывном режиме подачи в катодной камере была исследована в трех электролизерах EDC-3, EDP-2 и EDP-5 и на основе разных потоков МС.

Обработка МС в периодическом режиме показала эффективность использования электролизеров: EDC-3 (с полуцилиндрическим корпусом), что позволяет увеличить активную поверхность обработки, и EDP-2 (с корпусом в форме параллелепипеда), выбранных для установления эффективности непрерывной переработки сыворотки с помощью данного типа электролизеров, которые имеют соотношение объема (V, мл) обрабатываемой МС к поверхности электрода (*S*, см ^{2}), (соотношение *V*/*S*, мл/см^2) равно 1,0 мл/см^2 для аппарата EDP-2 [17–20].

Электролизер EDC-3 представляет собой полуцилиндрический диэлектрический корпус с анодной и катодной ячейками и содержит катион-обменную мембрану МК-40, катод и анод. Расстояния между электродами, а также между электродами и мембраной были одинаковыми, соотношение объема обрабатываемой МС к поверхности электрода V/S составляет 2,0 мл/см^2 для EDC-3 [17]. Электролизер EDC-3 является технически улучшенным вариантом мембранного электролизера» (патент 3496, 2008) [22].

Щелевой электролизер EDP-5 (рис. 2) предназначен для фиксации гетерогенной катионной мембраны МК-40 и проведения процесса в непрерывном режиме обработки МС. Отношение *V*/*S* в аппарате EDP-5 равно 0,3 мл/см^2.

В непрерывном режиме скорость расхода молочной сыворотки в катодной камере (КК) для

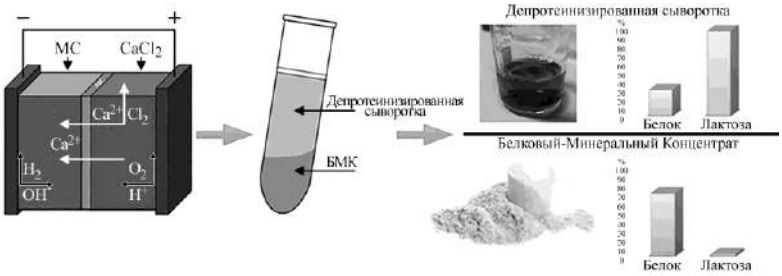


Рис. 1. Фракционирование молочной сыворотки при электроактивации.

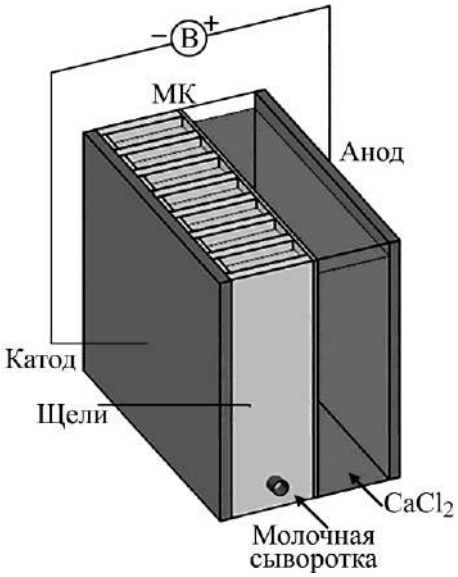


Рис. 2. Схема щелевого электролизера EDP-5.

EDC-3 была установлена 100,0 мл/мин при исходном объеме МС в КК 1500,0 мл. Для EDP-2 – 6,0 мл/мин при исходном объеме МС в КК 120,0 мл, а для EDP-5 – 10,0 мл/мин при исходном объеме МС в КК 25,0 мл. Скорость подачи вторичной жидкости в анодную камеру (АК) или анодной жидкости (АЖ) для EDC-3 и EDP-5 была аналогична скорости подачи сыворотки в катодную камеру, а для EDP-2 вторичная жидкость в анодную камеру не подавалась. Плотность электрического тока j = 20 мА/см^2 поддерживалась постоянной во время обработки.

Содержание белка определяли методом Варбурга на спектрофотометре СФ-56 (стандартный раствор – бычий сывороточный альбумин BSA, калибровочный коэффициент k = 1,72) [23].

Количество белка, извлекаемого в БМК (степень извлечения белка в БМК – Q, %), рассчитывали по разнице между содержанием белка в исходной молочной сыворотке (ИМС) и оставшимся в депротеинизированной сыворотке:

$$Q = Q_{ИМС} – Q_{ДС}, \%, \quad (1)$$

где Q – содержание белка в БМК; $Q_{ИМС}$ – содержание белка в ИМС; $Q_{ДС}$ – содержание белка в ДС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Напряжение при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности тока j = 20 мА/см^2 остается постоянным в процессе обработки в EDP-2 и EDC-3, а в EDP-5 увеличивается к концу обработки, что свидетельствует о повышении глобального омического сопротивления по двум причинам: технологической – истощение обрабатываемой среды от носителей заряда, которые, возможно, интенсивно участвуют в образовании БМК; технической – забивание щелей БМК после 40 мин обработки как следствие очень низкого соотношения V/S, равного 0,3 мл/см^2 (табл. 1).

Характеристика электрических параметров при электроактивации молочной сыворотки в непрерывном режиме с использованием различных электролизеров

Расход энергии A (Вт·ч) при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности тока 20 мА/см^2 в разных электролизерах также различен из-за технологической емкости электролизера и геометрической конфигурации (табл. 1).

Таблица 1. Изменение напряжения и потребляемой энергии при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки

Время обработки	j = 20 мА/см^2					
	EDP-2		EDC-3		EDP-5	
	U, В	A, (Вт·ч)	U, В	A, (Вт·ч)	U, В	A, (Вт·ч)
5 мин	10	1.67	14	18.67	6	0.80
15 мин	11	5.50	14	56.00	6	2.40
25 мин	12	10.00	14	93.33	8	5.33
35 мин	10	11.67	14	130.67	8	7.47
45 мин	10	15.00	14	168.00	–	–
60 мин	10	20.00	14	224.00	–	–

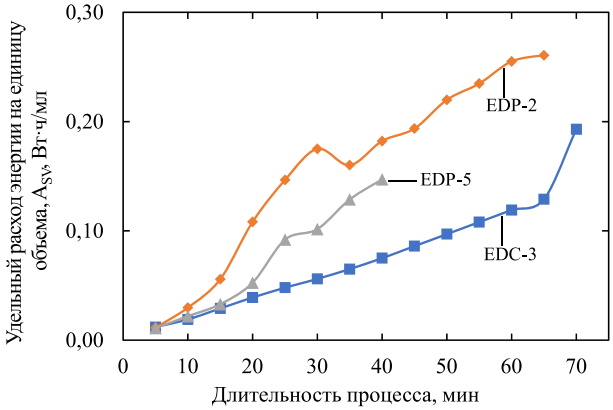


Рис. 3. Удельный расход энергии на единицу объема A_{SV} (Вт·ч/мл) при электроактивации в непрерывном режиме подачи МС при плотности электрического тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах: EDP-2 (6,0 мл/мин), EDC-3 (100,0 мл/мин), EDP-5 (10,0 мл/мин).

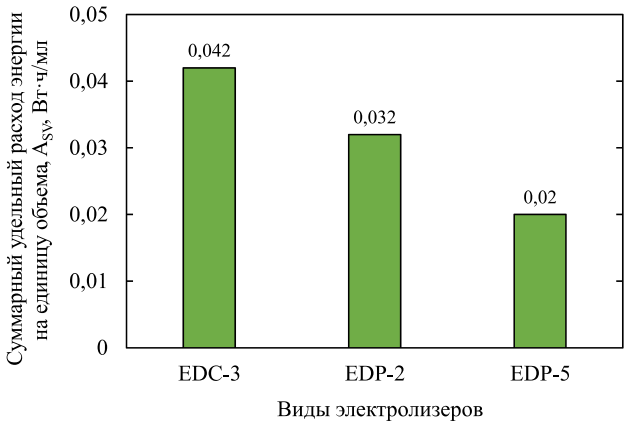


Рис. 4. Суммарный удельный расход энергии на единицу объема A_{SV} (Вт·ч/мл) при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах: EDP-2 (6,0 мл/мин), EDC-3 (100,0 мл/мин), EDP-5 (10,0 мл/мин).

Удельный расход энергии на единицу объема показывает самые высокие значения при переработке молочной сыворотки в EDP-2, что обусловлено геометрической формой электролизера и концентрацией ионов кальция в анодной жидкости v = 0,0144 моль, обеспечивающей электропроводность среды. При обработке в электролизере EDC-3 удельный расход энергии значительно ниже, чем при электроактивации МС в аппарате EDP-2, что обусловлено большим соотношением V/S, полуцилиндрической формой корпуса и более высокой концентрацией ионов кальция в анодной камере (v = 1,35 моль). Электроактивация МС в электролизере EDP-5 имеет самые низкие значения энергопотребления на единицу объема при непрерывной обработке в течение 40 мин, однако существуют препятствия для повышения производительности обработки (размер щелей, геометрическая конфигурация, скорость расхода сыворотки и концентрация ионов кальция в катодной камере) (рис. 3).

Суммарный удельный расход энергии на единицу объема A_{SV} (Вт·ч/мл) при непрерывной электроактивации МС в различных электролизерах EDP-5, EDC-3 и EDP-2, плотности электрического тока 20 мА/см^2 определяет энергоэффективность использования щелей в электролизере EDP-5 (рис. 4).

Таблица 2. Изменение температуры при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки в различных электролизерах

Время обработки	j = 20 мА/см^2					
	EDP-2		EDC-3		EDP-5	
	$t_Ж$, °C	$t_П$, °C	$t_Ж$, °C	$t_П$, °C	$t_Ж$, °C	$t_П$, °C
исходное	14.0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
5 мин	19.0	16,7	18,5	18,5	18,1	18,1
15 мин	27,0	18,8	27,0	19,9	19,8	19,8
25 мин	32,0	21,6	34,0	21,5	19,7	19,7
35 мин	34,0	23,5	33,5	22,6	19,4	19,4
45 мин	35,5	25,0	37,0	22,8	–	–
60 мин	37,0	26,6	42,0	27,7	–	–

Характеристика термических параметров при электроактивации молочной сыворотки в непрерывном режиме с использованием различных электролизеров

Электроактивация МС в катодной камере приводит к образованию двух фаз: пенной и жидкой. Это позволило зарегистрировать температуру в жидкой фазе ($t_Ж$, °C) и в пенной фазе ($t_П$, °C).

Изменение температуры t, °C при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки, при плотности электрического тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах в значительной степени зависит от удельного расхода энергии и от расхода МС на единицу начального объема. Электроактивация в аппарате EDP-5, где расход МС на единицу начального объема является самым высоким (0,4) по сравнению с переработкой, сыворотка в электролизерах EDC-3 (0,063) и EDP-2 (0,052) обеспечивает стабильное поддержание температуры на протяжении всего процесса переработки (табл. 2).

Электроактивация МС в EDC-3 указывает на более медленный рост температуры в жидкой фазе благодаря снижению общего омического сопротивления и более высокой производительности по сравнению с EDP-2 (корпус в форме параллелепипеда), что исключает термическое денатурирование сывороточных белков, извлеченных в БМК.

С технической точки зрения использование щелевого электролизера с полуцилиндрическим каркасом является обоснованным в плане поддержания низкой температуры обработки и исключения джоулева нагрева.

Характеристика физико-химических параметров при электроактивации молочной сыворотки в непрерывном режиме обработки в различных электролизерах

При электроактивации происходит диссоциация воды на электродах, что нарушает гидратные оболочки молекул белков и приводит к их осаждению и коагуляции белков, которые вместе с ионами щелочноземельных элементов выделяются в виде БМК. Электрический ток активирует межмолекулярные связи и ионные радикалы аминокислот, что способствует множественным взаимодействиям, как межмолекулярным, так и внутримолекулярным, приводящим к агрегации и перераспределению белковых молекул. Образующиеся гидроксил-ионы при диссоциации воды на катоде вследствие электроактивации придают среде щелочные свойства. Кроме того, выделение водорода способствует ионной флотации, создавая пенную фазу, и приводит к высаливанию белков из-за большого количества ионов минералов, мигрирующих через гетерогенную катионовую мембрану МК-40 из анодной камеры. Этот процесс усиливается, что способствует «развертыванию» белковых молекул и активирует дополнительные аминогруппы аминокислот, повышая pH в катодной камере. В результате белковые молекулы проходят через свои изоэлектрические точки и осаждаются. Интенсивные восстановительные реакции, происходящие в катодной камере, характеризуются окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП) [17–20].

Изменение физико-химических параметров (pH и ОВП) при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности электрического тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах зависит от нескольких факторов: геометрической конфигурации, технических параметров электролизеров, концентрации ионов кальция в анодной камере, расходов молочной сыворотки и вторичной жидкости.

Электроактивация МС в непрерывном режиме в электролизере EDC-3, который имеет наибольшую емкость, свидетельствует о переходе аквакомплексов в гидроксокомплексы, в отличие от EDP-2 и EDP-5, где этот переход практически не был идентифицирован, возможно, он происходит в первые 5 минут

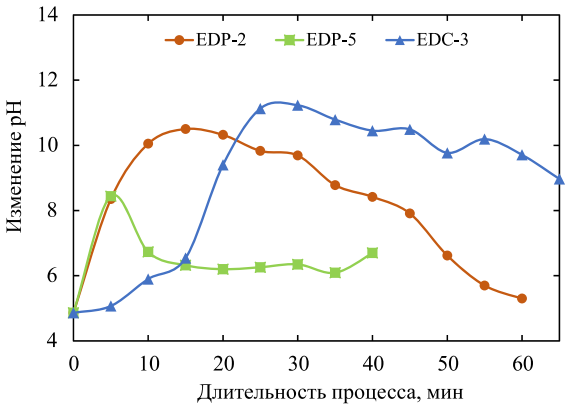


Рис. 5. Изменение pH при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности электрического тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах: расходы МС в EDP-2 (6,0 мл/мин), EDC-3 (100,0 мл/мин) и EDP-5 (10,0 мл/мин).

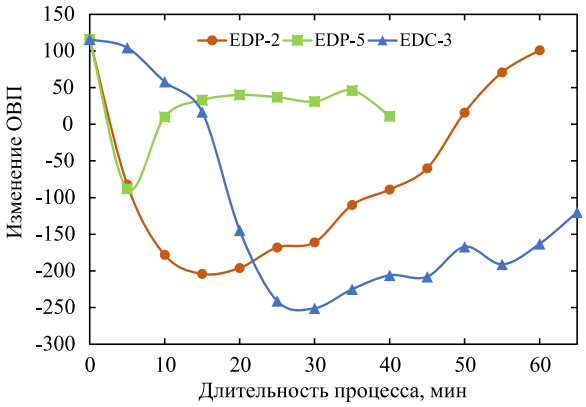


Рис. 6. Изменение ОВП при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности электрического тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах: расходы МС в EDP-2 (6,0 мл/мин), EDC-3 (100,0 мл/мин) и EDP-5 (10,0 мл/мин).

Таблица 3. Изменение pH и ОВП в релаксации после электроактивации МС в EDP-2, j = 20 мА/см^2, при непрерывном режиме подачи МС в катодной камере

Время обработки	Период релаксации				Период релаксации			
	pH				ОВП			
	1 ч 20 мин	6 ч 34 мин	49 ч 6 мин	68 ч 39 мин	1 ч 20 мин	6 ч 34 мин	49 ч 6 мин	68 ч 39 мин
5 мин	6,69	6,83	7,26	7,03	12	2	–21	–8
10 мин	10,2	9,34	8,9	7,91	–189	–42	–114	–58
15 мин	11,15	10,24	9,09	8,02	–242	–198	–126	–64
20 мин	10,95	10,48	8,82	7,96	–193	–206	–110	–61
25 мин	10,95	10,3	8,75	8,12	–233	–195	–105	–70
30 мин	10,83	10	8,5	8,02	–225	–178	–92	–64
35 мин	10,21	9,58	8,5	7,96	–189	–154	–92	–61
40 мин	9,08	8,67	10,7	7,94	–125	–101	–218	–60
45 мин	7,15	7,33	7,14	7,07	–14	–23	–14	–10
50 мин	6,9	7,07	7,5	6,75	–1	–10	–34	9
55 мин	6,31	6,33	6,37	6,21	34	32	30	40
60 мин	6,31	6,47	3,93	6,14	34	25	169	43
Катодная камера	3,6	3,84	3,69	3,65	188	186	183	186

Таблица 4. Изменение pH и ОВП в релаксации после электроактивации МС в EDC-3, j = 20 мА/см^2, при непрерывном режиме подачи МС в катодной камере

Время обработки	Период релаксации			Период релаксации		
	pH			ОВП		
	1 ч 32 мин	10 ч 35 мин	75 ч 10 мин	1 ч 32 мин	10 ч 35 мин	75 ч 10 мин
5 мин	5,03	5,11	5,15	107	103	100
10 мин	5,81	5,75	5,67	62	66	69
15 мин	6,51	6,65	6,7	22	13	9
20 мин	9,25	8,78	8,1	–135	–110	–71
25 мин	10,86	10,4	8,9	–227	–200	–116
30 мин	11,15	10,83	8,05	–244	–226	–126
35 мин	10,72	10,36	9,03	–219	–199	–123
40 мин	10,55	10,21	9,1	–209	–190	–125
45 мин	10,37	10,01	8,93	–199	–179	–115
50 мин	9,99	9,6	8,79	–177	–156	–108
55 мин	10,37	10	9,05	–199	–178	–122
60 мин	9,9	9,61	8,83	–172	–153	–108
65 мин	9,07	8,86	8,52	–124	–112	–93
Катодная камера	9,74	9,56	9,07	–163	–152	–125

Таблица 5. Изменение pH и ОВП в релаксации после электроактивации МС в EDP-5, j = 20 мА/см^2, при непрерывном режиме подачи МС в катодной камере

Время обработки	Период релаксации			Период релаксации		
	pH			ОВП		
	56 мин	115 ч 13 мин	119 ч 34 мин	56 мин	115 ч 13 мин	119 ч 34 мин
5 мин	8,34	7,46	7,34	–83	–32	–25
10 мин	6,7	6,77	6,75	11	7	8
15 мин	6,3	6,07	6,06	34	47	48
20 мин	6,16	6,06	5,9	42	48	57
25 мин	6,25	5,82	6,04	37	59	49
30 мин	6,33	6,07	6,12	32	47	45
35 мин	6,09	5,83	5,87	47	61	58
40 мин	6,72	6,9	6,63	10	0	15

обработки (пробы собирались каждые 5 минут), что указывает на быстрые изменения при переходе аквакомплексов в гидроксокомплексы (рис. 5, 6).

Физико-химические параметры нестабильны в процессе обработки из-за конструкции электролизеров и необходимости поддержания расхода МС в процессе обработки.

Электроактивация МС вызывает метастабильное состояние, которое представляет собой неравновесную систему и при взаимодействии с окружающей средой теряет свои аномальные свойства в процессе хранения, проходя через псевдостабильное состояние до достижения стабильного термодинамического равновесия.

Величина pH и окислительно-восстановительного потенциала обрабатываемой МС в периоде после обработки (период релаксации) зависит как от используемых электролизеров, так и от режимов подачи МС и АЖ (табл. 3-5).

Наличие аномальных свойств электроактивированной молочной сыворотки, или метастабильного состояния, подтверждается колебаниями значений pH и окислительно-восстановительного потенциала в периоде релаксации, которые стремятся к термодинамическому равновесию, сопровождающемуся нестабильными колебаниями перехода аквакомплексов в гидроксокомплексы. В конце этих переходов устанавливается термодинамическое равновесие.

Изменения значений pH и ОВП во время обработки и в период релаксации электроактивированной МС в различных электролизерах в непрерывном режиме (равномерный поток сыворотки в катодной и анодной камерах) при j = 20 мА/см^2 важны для объяснения аспектов образования белковых соединений при извлечении сывороточных белков в БМК.

Характеристика биохимических параметров при электроактивации молочной сыворотки в непрерывном режиме в различных электролизерах

Электроактивация МС в непрерывном режиме подачи молочной сыворотки и анодной жидкости в электролизерах с различными емкостями (EDP-2, EDC-3, EDP-5), геометрическими конфигурациями и конструктивными параметрами, при различных расходах МС в катодной и хлорида кальция в анодной камерах, разных концентрациях ионов кальция в АЖ позволила получить неравномерное извлечения сывороточных белков в БМК.

Выделение сывороточных белков в БМК происходит одновременно с получением ДС, которая включает: частично изомеризованную лактулозу из лактозы, неизомеризованную лактозу, олигосахариды, минералы (в основном содержащие калий), пептиды и аминокислоты.

Извлечение белков в БМК во время обработки в электролизере EDP-2 в непрерывном режиме подачи сыворотки в катодную камеру при j = 20 мА/см^2 неоднородно и зависит от ряда факторов: геометрической конфигурации и технических параметров, расхода МС и АЖ, объема перерабатываемой сыворотки (рис. 7).

Управление расходом во время электроактивации в EDP-2 требует автоматического мониторинга и регулирования в зависимости от физико-химических параметров и степени извлечения сывороточных белков в БМК. Выделение белково-минеральных соединений в виде пены при обработке с помощью этого электролизера, у которого катод расположен вертикально, зависит как от ионной флотации, вызванной электроактивацией, так и от сил Архимеда, которые способствуют выталкиванию образовавшихся комплексов и схватыванию сывороточных белков в БМК (в течение первых 20 минут

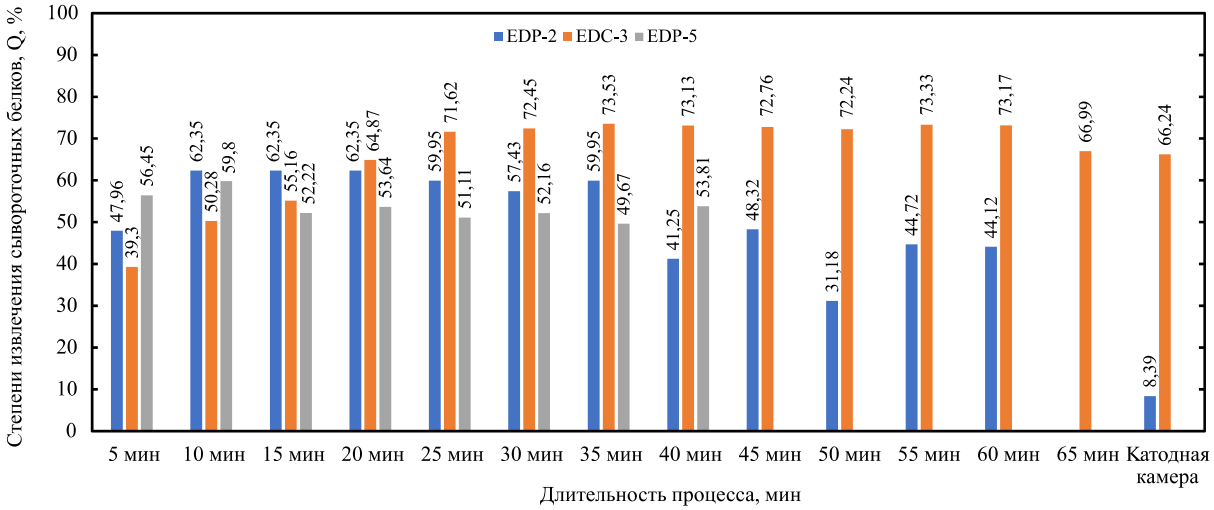


Рис. 7. Степени извлечения сывороточных белков *Q*, % в БМК при электроактивации в непрерывном режиме подачи МС при j = 20 мА/см^2 в различных электролизерах: EDP-2 (6,0 мл/мин), EDC-3 (100,0 мл/мин), EDP-5 (10,0 мл/мин).

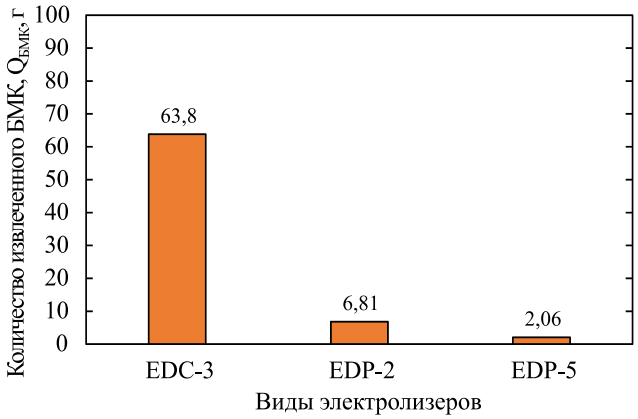


Рис. 8. Изменение суммарного количества извлеченного БМК ($Q_{БМК}$, г) при электроактивации в непрерывном режиме подачи МС при j = 20 мА/см^2 в различных электролизерах: EDP-2 (6,0 мл/мин), EDC-3 (100,0 мл/мин), EDP-5 (10,0 мл/мин).

наблюдается стабильное и равномерное извлечение – около 60–63%).

К концу процесса регистрируется меньшее количество белков, извлеченных в БМК из жидкой фазы (степень извлечения *Q* составляет около 8% в жидкой фазе или содержание в катодной камере), что обусловлено: образованием белковых гидролизатов, недостаточным расходом МС на данном этапе обработки и емкостью данного электролизера. Электроактивация в непрерывном режиме подачи МС в КК и АЖ в АК электролизера с полуцилиндрическим корпусом EDC-3 при плотности электрического тока 20 мА/см^2 позволяет извлечению сывороточных белков в БМК около 70–74% при первых 20 мин обработки, максимальные значения степени извлечения сохраняются в течение 40 мин (рис. 7).

Основное влияние на максимальную производительность при электроактивации МС в EDC-3 в непрерывном режиме обработки оказывает геометрическая конфигурация аппарата – полуцилиндрический корпус, на котором установлены катод и мембрана, а анод закреплен на трубчатом вале. Такая конструкция электролизера была предназначена для увеличения поверхности активации и способности выделения БМК в виде пены благодаря ионной флотации и действию архимедовых сил (рис. 7). Выделение сывороточных белков в БМК при электроактивации МС в щелевом электролизере в виде параллелепипеда EDP-5 показывает максимальное количество сывороточных белков, выделенных в БМК – 56–60% в первые 5–10 минут, и остается неизменным при дальнейшей обработке (рис. 7).

Суммарное количество извлеченного БМК ($Q_{БМК}$, г) при электроактивации МС в непрерывном режиме обработки при плотности тока 20 мА/см^2 в различных электролизерах демонстрирует экономическую эффективность использования электролизера EDC-3, что одновременно позволяет получить большее количество БМК при относительно более низком удельном потреблении энергии на единицу объема (рис. 8).

Обработка в EDC-3, который имеет наибольшую емкость, позволяет увеличить выделение сывороточных белков по сравнению с экспериментальными лабораторными установками EDP-2 и EDP-5, а использование щелей,

аналогичных электролизеру EDP-5, может повысить энергоэффективность процесса в непрерывном режиме обработки.

Электроактивация МС в различных электролизерах предусматривает разработку безотходного, экологического процесса выделения сывороточных белков при их извлечении в БМК в непрерывном режиме подачи МС и АЖ, а также определение влияния всех конструктивных/геометрических, электрических, термических, физико-химических и биохимических параметров.

Эти исследования позволят провести всестороннюю оценку геометрических и конструктивных параметров электролизеров с целью их адаптации к производственным масштабам и разработки щелевого электролизера с полуцилиндрическим корпусом для непрерывного режима работы [24].

ВЫВОДЫ

1. Электроактивация МС в непрерывном режиме обработки в различных электролизерах определяет энергоэффективность использования щелей, похожих на те, что имеются в аппарате EDP-5.

2. Показано, что температура в жидкой ($t_Ж$,ºC) и пенной ($t_П$,ºC) фазах при электроактивации МС в электролизерах с разными конструктивными/геометрическими параметрами в непрерывном режиме обработки не вызывает термическую денатурацию сывороточных белков при их выделении в БМК.

3. Установлено, что изменения физико-химических параметров (значений pH и окислительно-восстановительного потенциала) при непрерывном режиме обработки МС оказывают влияние на содержание сухого вещества при электроактивации МС в исследованных электролизерах и способствуют переходу аквакомплексов в гидроксокомплексы. Этот переход вызван многими изменениями в результате активации всех компонентов сухого состава и особенно белкового.

4. Найдено, что максимальная степень выделения (Q, %) сывороточных белков в БМК зарегистрирована при электроактивации МС в аппарате EDC-3 в непрерывном режиме подачи МС 100 мл/мин и при плотности тока 20 мА/см^2 и составляет около 70–74%.

5. Электроактивация МС в непрерывном режиме обработки позволила выявить основные параметры (удельный расход энергии на единицу объема, размер щелей, геометрическую конфигурацию аппарата) и составить исходные требования для разработки щелевого электролизера с полуцилиндрической конфигурацией и с наилучшими техническими и конструктивными характеристиками.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках подпроекта 011203 «Исследование и разработка преимуществ электроконвекции, электроактивации и магнитной флюидизации при повышении теплопередачи и обработке».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. El-Aidie, S.A.M. and Khalifa, G.S.A., Innovative applications of whey protein for sustainable dairy industry: Environmental and technological perspectives—A comprehensive review, *Compr. Rev. Food Sci. Food Safety*, 2024, vol. 23, no. 2, art. ID e13319. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13319

2. Ebrahim, T.Y., Clean and sustainable technology innovation, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 2020, vol. 45, p. 113. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.11.004

3. Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E. and Hebishy, 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

4. Zandona, E., Blažić, M. and Jambrak, A.R., 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

5. Tamasiga, P., Miri, T., Onyeaka, H. and Hart, A., Food waste and circular economy: challenges and opportunities, *Sustainability*, 2020, vol. 14, no. 16, art. ID 9896. https://doi.org/10.3390/su14169896

6. Wang, H., Khan, M., Anwar, F., Shahzad, F., et al., Green innovation practices and its impacts on environmental and organizational performance, *Front. Psychol.*, 2021, vol. 11, art. ID 553625. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.553625

7. 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, p. 230. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.025

8. Zotta, T., Solieri, L., Iacumin, L., Picozzi, C., et al., Valorization of cheese whey using microbial fermentations, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2020, vol. 104, no. 7, p. 2749. https://doi.org/10.1007/s00253-020-10408-2

9. Rabbi, M.F. and Amin, M.B., Circular economy and sustainable practices in the food industry: A comprehensive bibliometric analysis, *Cleaner Respons. Consump.*, 2024, vol. 14, art. ID 100206. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100206

10. Wilson, D.C., Learning from the past to plan for the future: An historical review of the evolution of waste and resource management 1970–2020 and reflections on priorities 2020–2030 – The perspective of an involved witness, *Waste Manag. Res.*, 2023, vol. 41, no. 12, p. 1754. https://doi.org/10.1177/0734242X231178025

11. Paladii, I., Vrabie, E., Sprincean, C. and Bologa, M., Part 1: Classification, composition, properties, derivatives, and application, *Surf. Eng. Appl. Electroch.*, 2021, vol. 5, 57, p. 579. https://doi.org/10.3103/S1068375521050112

12. Paladii, I.V., Vrabie, E.G., Sprinchan, K.G. and Bologa, M.K., Whey: Review. Part 2. Treatment processes and methods, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, p. 651. https://doi.org/10.3103/S1068375521060119

13. Karim, A. and Aider, M., Sustainable valorization of whey by electroactivation technology for *in situ* isomerization of lactose into lactulose: Comparison between electroactivation and chemical processes at equivalent solution alkalinity, *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 14, p. 8380. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00913

14. Bologa, M., Vrabie, E., Chiţanu, A., Laiciuc, L., Stepurina, T., Vrabie, V., Paladii, I., et al., Recovery of proteine mineral concentrates from acid whey by electro-activation, *J. Eng. Sci.*, 2019, vol. 26, no. 4, p. 124. https://doi.org/10.5281/zenodo.3591616

15. Aider, M., Electro-activation as emerging technology for proteins extraction from plant materials: theory and applications. In: *Green Protein Processing Technologies from Plants*. Hernández-Álvarez, A.J., Mondor, M., Nosworthy, M.G. (eds). Cham: Springer, 2021, p. 89. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16968-7_4

16. Momen, S., Alavi, F. and Aider, M., Impact of alkaline electro-activation treatment on physicochemical and functional properties of sweet whey, *Food Chem.*, 2022, vol. 373, Part A, art. ID 131428. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131428

17. 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. https://doi.org/10.3103/S1068375519020145

18. Paladii, I., Vrabie, E., Vrabie, V., Bologa, M., et al., Electroactivation emerging method of processing of whey with high protein content: *Sci. Papers. Ser. D. Animal Science*, 2023, vol. 66, no. 1, p. 465.

19. 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, p. 824. https://doi.org/10.3103/S1068375523060145

20. Paladii, I., Recovery of protein–mineral concentrates by electroactivation of whey with low protein content, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2024, vol. 60, p. 640. https://doi.org/10.3103/S1068375524700261

21. Vrabie, E., Bologa, M., Paladii, I., Vrabie, V., et al., Nanotechnological aspects at electro-activation of secondary dairy products, *IFMBE Proceedings, vol. 77. 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2019.* Tiginyanu, I., Sontea, V., Railean, S. (eds). Cham: Springer. 2020, p. 799. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31866-6_142

22. Maximuk, E., Bologa, M., Condratenco, S. and Sprincean, E., Electrolizor cu diafragmă. Brevet de invenție 3496 G2. Institutul de Fizică Aplicată. Nr. depozit a 2006 0171. Data depozit 29.06.2008. Publicat 29.02.208. In: BOPI 11/2008 F1, BOPI 02/2008.

23. 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.

24. Bologa M., Vrabie, E., Maximuk, E., Paladii, I., Policarpov, A., Goncearuc, V., Sprincean, C., Electrolizor cu fisuri, Brevet de invenție 1325 (13) Y, Institutul de Fizică Aplicată. Nr. depozit, s2018 0079. Data depozit 25.07.2018. Publicat 31.10.2019. In: BOPI. 2019, nr. 3, pp. 55-56.

Summary

The study demonstrates that the electroactivation of whey, carried out in a continuous regime in various electrolyzers, is one of the important stages in the chain of development of a wasteless, environmentally friendly technology for the recovery of whey proteins into complexes called protein-mineral concentrates. The regime of whey and anode liquid supply, the design and geometry of the used electrolyzers, the variation of electrical parameters, in particular, the specific energy consumption per unit volume, temperature changes as well as the values of pH and redox potential and biochemical changes of the solids and protein composition of whey, are among the main components in the development of technology at the industrial scale. It has been established that the specific energy consumption per unit volume at the processing with a semi-cylindrical electrolyzer (EDC-3) is significantly lower compared to the electroactivation of whey in the EDP-2 electrolyzer with a parallelepiped casing, due to a higher capacity of the electrolyzer and an increased concentration of calcium ions. However, it is higher in the case of processing in the slotted electrolyzer (EDP-5), nearly twice as high. Studies on the changes of the parameters mentioned above during the electroactivation of whey led to the development of a slot-type electrolyzer with a semi-cylindrical body for continuous processing.

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