

Усовершенствованные биотехнологические принципы получения ферментативных сывороточных гидролизатов с обогащенным аминокислотным составом*

Иван Сергеевич Родионов, аспирант

E-mail: rodionovivan261@gmail.com

Иван Алексеевич Евдокимов, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, профессор, заведующий базовой кафедрой технологии молока и молочных продуктов

E-mail: ievdokimov@nfcfu.ru

Елена Анатольевна Абакумова, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной биотехнологии

E-mail: abacum0ffa@yandex.ru

Егор Эдуардович Чумаков, магистр

E-mail: chumakofff.egor@gmail.com

Алексей Дмитриевич Лодыгин, д-р. техн. наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, заведующий кафедрой прикладной биотехнологии

E-mail: allodygin@yandex.ru

Дмитрий Михайлович Назаренко, магистр

E-mail: d.masta121@gmail.com

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Проблемы переработки молочной сыворотки, несмотря на многообразие существующих технологий и продуктов, до настоящего времени остаются актуальными, особенно с учетом высокой ценности сывороточных белков. Одним из наиболее востребованных направлений является создание функциональных напитков, при производстве которых используется процесс ферментативного гидролиза белков молочной сыворотки. Целью данной работы является изучение и совершенствование технологических параметров ферментативного гидролиза белков молочной сыворотки. Предложены биотехнологические принципы получения напитков, включающие электрохимическую активацию и ферментативный гидролиз белков молочной сыворотки. Изучено влияние электрохимической активации на динамику изменения pH молочной сыворотки, степень и продолжительность ферментативного гидролиза. В образцах гидролизованной сыворотки исследованы пептидные профили и число свободных аминогрупп с использованием системы Experion Pro260. Применение электрохимической активации позволяет интенсифицировать процесс гидролиза белков молочной сыворотки и повышает эффективность действия гидролитических ферментов. Проведена оптимизация процесса ферментативного гидролиза белков молочной сыворотки, обработанной электрохимической активацией, и определены оптимальные параметры процесса гидролиза: pH – 7,25, продолжительность ферментации – 6 ч, температура – 38–40 °C при использовании ферментов с активностью 25 000 и 36 000 единиц на мл. Анализ количественного и качественного состава спортивных напитков подтвердил обогащение аминокислотного состава.

Ключевые слова: молочная сыворотка, подсырная сыворотка, ферменты, панкреатин, ферментативный гидролиз, трансформация, электрохимическая активация

Для цитирования: Усовершенствованные биотехнологические принципы получения ферментативных сывороточных гидролизатов с обогащенным аминокислотным составом / И. С. Родионов, И. А. Евдокимов, Е. А. Абакумова [и др.] // Сыроделие и маслоделие. 2025. № 4. С. 26–33. <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-4-41>

Введение

Молочная сыворотка – вторичное молочное сырье, образующееся в результате производства сыра и творога. В ряде стран такое сырье считается промышленными отходами с низкой добавленной стоимостью [1]. На сегодняшний день годовой объем производства молочной сыворотки в мире превышает 220 млн т. Выход сыворотки при этом достигает 85–90 % от общего объема перерабатываемого сырья, а в ее составе содержится

примерно половина питательных веществ молока [2]. В сухом веществе молочной сыворотки можно выделить основные составляющие, процентное соотношение которых выглядит так: лактоза занимает примерно 70 %, азотистые вещества – около 14,5 %, жир – порядка 7,5 %, минеральные соли – около 8 %. Важно отметить, что исключительная биологическая ценность сыворотки определяется сывороточным протеином.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00264, <https://rscf.ru/project/25-26-00264/>

Помимо этого, молочная сыворотка содержит в себе витамины, гормоны, разнообразные органические кислоты, иммунные тела, а также полезные микроэлементы [3].

Сывороточный протеин представляет собой набор глобулярных белков с высоким уровнем α -спиральной структуры, а кислотно-основные и гидрофобно-гидрофильные аминокислоты распределены в довольно сбалансированной форме [1]. Альфа-лактальбумин и бета-лактоглобулин являются преобладающими и составляют около 70–80 % от общего количества сывороточных протеинов. Среди других типов сывороточных белков следует упомянуть иммуноглобулины, сывороточный альбумин, лактоферрин, лактопероксидазу и протеозопептоны [4]. Сывороточные протеины характеризуются наличием вторичной, третичной и четвертичной структур. Они термолабильны, стабилизируя свою протеиновую структуру посредством межмолекулярных дисульфидных связей [5].

При этом сброс молочной сыворотки не только приводит к потере ценных питательных веществ, но и увеличивает загрязнение окружающей среды из-за присутствия большого количества органических веществ и характеризуется высокой биологической потребностью в кислороде 30 000–60 000 частей на миллион [6].

Наличие питательных веществ в молочной сыворотке и, как следствие, ее высокая биологическая ценность обуславливает повышенный интерес к ее переработке. Современный рынок молочных ингредиентов показывает, что более 50 % всей производимой в мире подсырной сыворотки перерабатывается в различные продукты питания. Около 45 % таких продуктов производится в жидкой форме, а 30 % – в виде сухого порошка сыворотки, причем более 15 % в виде кристаллической лактозы и различных побочных продуктов ее переработки, а остающиеся – в виде концентратов сывороточных белков [7, 8]. Основные компоненты сыворотки включают лактозу, белки, витамины и минералы, что обуславливает использование различных технологических и физико-химических процессов обработки для ее использования в качестве основного компонента при производстве пищевых и фармацевтических продуктов [8].

Источник изображения: архив КемГУ



Существует два направления, на которые можно подразделить процессы переработки молочной сыворотки. Первое направление – это прямая физическая и термическая обработка с получением сухого порошка сыворотки, концентратов и изолятов сывороточных белков, сывороточного пермата, лактозы и других продуктов. Второе направление предполагает биотехнологическую обработку, при которой сыворотка используется в качестве субстрата для различных микробиологических либо ферментативных процессов при получении продуктов, к которым относятся кормовые средства и концентраты для животных, пробиотики, органические кислоты, ферменты и т. д. [7–10].

Вследствие воздействия различных ферментов, таких как пищеварительные ферменты или различные микробные протеазы, биологически активные пептиды освобождаются из последовательности белка и тем самым переходят в активную форму, придавая гидролизатам различные функциональные свойства [11, 12].

Пептиды, полученные из фракций казеина и сывороточных белков, включая опиоидные пептиды, антигипертензивные пептиды, казеиновые фосфопептиды, гликомакропептиды и лакторфины, обладают различными физиологическими функциями, такими как опиоидодобные свойства, иммуностимулирующая и антигипертензивная активность, антибактериальное и противовирусное воздействие, а также способствуют улучшению усвоения кальция [4].

В отличие от химического и физического гидролиза, который проходит при экстремальных режимах (высокая температура, крайне низкий или высокий pH), ферментативный гидролиз белков осуществляется в более щадящих условиях: при pH 6–8 и температуре 35–60 °C.

Следует отметить, что в результате ферментативного гидролиза практически не происходит потери

аминокислот и биологической ценности конечного продукта. Особенностью действия протеолитических ферментов является специфичность по отношению к пептидной связи [13, 14]. В зависимости от содержания аминокислот, молекулярной массы, полипептидной принадлежности, наличия ди-, три- и олигопептидов может быть определена область наиболее эффективного использования полученных гидролизатов молочной сыворотки. Помимо этого, дополнительной привлекательностью для производства белковых гидролизатов являются их технологические свойства: достаточно высокая устойчивость к образованию осадка при воздействии разных факторов, таких как изменение кислотности (рН) или присутствие ионов металлов, стойкость при обработке высокими температурами и улучшенная способность растворяться [15].

Все ферменты имеют оптимальные значения рН, температуры и концентрации субстрата, при которых они проявляют максимальную активность. Известно, что эффективность ферментативного гидролиза зависит от нескольких факторов и в первую очередь от рН среды, в которой происходит реакция [16]. Изменение рН может повлиять на активность фермента и, следовательно, на процесс гидролиза, а чрезвычайно низкие или высокие значения рН могут вызвать денатурацию ферментов, что приводит к их инактивации. В связи с тем, что при производстве молочной сыворотки наблюдаются колебания уровня рН, было решено применить электрохимическую активацию для стабилизации активной кислотности сырья [17]. Применимость электрохимической активации к обработке молочной сыворотки обусловлена относительно высоким содержанием минеральных веществ в сыворотке (0,05 г/л) и наличием у нее необходимых свойств для быстрого и эффективного накопления активных заряженных частиц [13].

Электрохимическая активация – это комплекс взаимосвязанных реакций в области пространственного заряда у поверхности электродов и электрохимических воздействий на среду с содержащимися в ней ионами и молекулами растворенных веществ при неравновесном переносе заряда через границу «электрод – электролит» в условиях минимального выделения тепла [18]. Явным достоинством при использовании электрохимической активации является уменьшение или полное исключение химических реагентов, снижение

загрязненности отработанных растворов, повышение качества целевых продуктов, сокращение продолжительности обработки, повышение эффективности различных технологических процессов.

Целью работы являлось усовершенствование технологических параметров ферментативного гидролиза молочной сыворотки.

Объекты и методы исследования

Ферменты. В ходе исследований использовались ферментные препараты панкреатина (фирма «Эрмиталь») с различной активностью – 10 000, 25 000 и 36 000 Ед. Эти панкреатические препараты представляют собой сложный биологический продукт, который производится из поджелудочных желез животных, в основном свиней. В их состав входят ферменты, обладающие различными видами активности: липолитической, амилолитической и протеолитической.

Подсырная сыворотка. Подсырная сыворотка (по ГОСТ 34352-2017 «Сыворотка молочная – сырье», обезжиренная подсырная сыворотка, гидролизованная подсырная сыворотка, ферментированная молочная сыворотка).

Установка для проведения электрохимической активации. Для оптимизации параметров ферментативного гидролиза молочной сыворотки использовалась экспериментальная лабораторная установка электрохимической активации. Схема электроактиватора представляет собой конструкцию, включающую в себя емкость, пару электродов и полупроницаемую ионообменную мембрану (анионитовая или катионитовая), которая имеет форму перегородки или мешка. Данная мембра необходима для размещения в ней одного из электродов. В результате электрохимического процесса при воздействии постоянного электрического поля происходит получение анодной (кислой) и катодной (щелочной) воды. При этом возле анода формируется кислая среда (анолит с рН 2,0–2,5), а возле катода образуется щелочная среда (католит с рН 10,0–12,0).

Прибор автоматического электрофореза

Experion Pro260. Experion Pro260 используется для экспресс-анализа белков с помощью автоматизированной системы электрофореза. Система

Experion использует микрофлюидную технологию LabChip для автоматизации электрофореза белков и нуклеиновых кислот путем интеграции разделения, обнаружения и анализа данных на одной платформе. Прибор состоит из аппаратной части и чипов для автоматического электрофореза. Внутри каждого чипа ряд микроканалов соединяет лунки для образцов с разделительным каналом и буферными лунками. Набор электрородов в станции электрофореза подает напряжение на микроканалы, заставляя заряженные молекулы в образцах мигрировать в разделительный канал, через который последовательно анализируются образцы с достаточной высокой задержкой между ними, чтобы предотвратить перекрестное загрязнение.

Результаты и их обсуждение

Для улучшения эффективности ферментативного гидролиза молочной сыворотки изучалось влияние таких факторов, как начальный pH молочной сыворотки, температура, продолжительность ферментативного гидролиза и активность фермента.

Сухую подсырную сыворотку восстанавливали дистиллированной водой при температуре 38–40 °C до содержания 6,0 % сухих веществ, что соответствовало массовой доле белка 0,8 %. Восстановленную сыворотку пастеризовали при температуре 75 °C и охлаждали до 38 °C. Восстановленную сыворотку разделяли на 3 образца, которые подвергли воздействию электрохимической активации до значений pH 7,0, 7,25 и 7,5. Далее в образцы вносили фермент с различной активностью – 10 000, 25 000 и 36 000 ЕД в количестве 0,1 % от объема раствора. Продолжительность ферментативного гидролиза составляло 4, 6 и 8 ч соответственно.

По завершении процесса ферментации определяли массовую долю аминного азота в подсырной сыворотке методом формольного титрования. Полученные результаты позволили выявить достоверное увеличение содержания свободных аминогрупп в образцах после ферментации по сравнению с исходной молочной сывороткой.

На рисунках 1, 2 представлены диаграммы Парето как «стандартизованные эффекты», которые рассчитывались по соотношению между «значениями эффекта» и их стандартным отклонением, полученным в ходе оптимизации процесса.

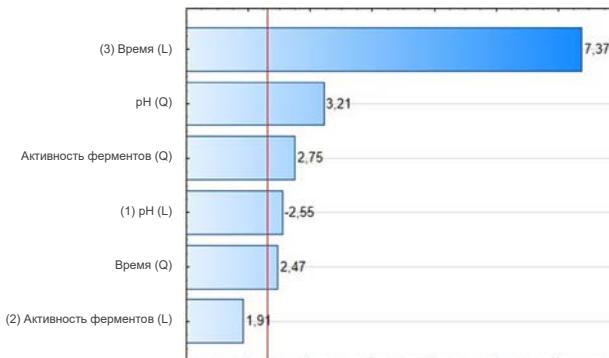


Рисунок 1. Сравнительное влияние продолжительности ферментативного гидролиза и начального pH молочной сыворотки на титруемую кислотность молочной сыворотки

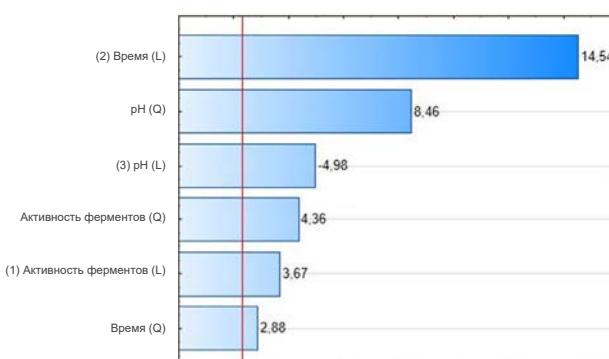


Рисунок 2. Сравнительное влияние продолжительности ферментативного гидролиза и начального pH молочной сыворотки на изменения аминного азота аминогрупп

На рисунках 1, 2 вертикальная красная линия отделяет значимые факторы и взаимодействия. Эта линия на оси X соответствует критическому значению распределения Стьюдента, которое определяется с учетом степени свободы, вовлеченою в расчет стандартного отклонения эффектов, и уровня достоверности [19].

Анализ данных, представленных на рисунке 2, позволяет сделать вывод о том, что главными факторами, оказывающими наибольшее влияние на содержание аминного азота, являются продолжительность ферментативного гидролиза и pH, значения которого регулируются в установке электрохимической активации.

На рисунках 3–5 представлены поверхности отклика титруемой кислотности молочной сыворотки при варьировании входных параметров. Поверхности отклика – математический метод

исследования зависимости результативности системы от множества варьируемых параметров, применяемый для моделирования аналитических исследований [20].

На рисунке 3 показано влияние активности фермента и продолжительности ферментативного гидролиза. Из рисунка видно, что постепенное увеличение титруемой кислотности прямо пропорционально продолжительности ферментативного гидролиза и достигает своего максимального значения через 6–8 ч. При этом максимальное значение достигается при активности фермента 25 000 Ед.

На рисунке 4 представлена зависимость титруемой кислотности от начального значения pH молочной сыворотки и продолжительности ферментативного гидролиза. Данный рисунок характеризуется прямо пропорциональной зависимостью между длительностью ферментативного гидролиза и начальным значением pH молочной сыворотки, но при этом максимальное значение наблюдается при значении pH 7,25 и продолжительности ферментативного гидролиза 6–8 ч.

На рисунке 5 показана зависимость титруемой кислотности от начального значения pH и ферментативной активности. Максимальное значение

титруемой кислотности наблюдается при pH 7,25 и достигает своего максимума при ферментативной активности 25 000 Ед.

На рисунках 6–8 представлены поверхности отклика выходного параметра изменения концентрации аминного азота.

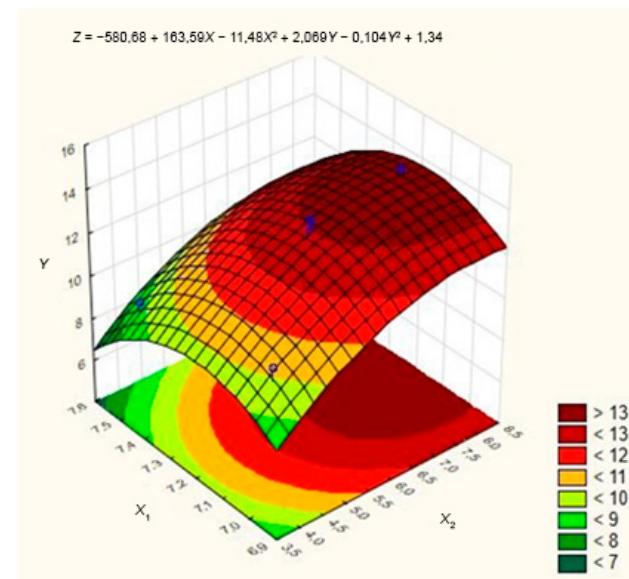


Рисунок 4. Поверхность отклика изменения титруемой кислотности (Y) молочной сыворотки в зависимости от начального pH молочной сыворотки (X_1) и продолжительности ферментативного гидролиза (X_2)

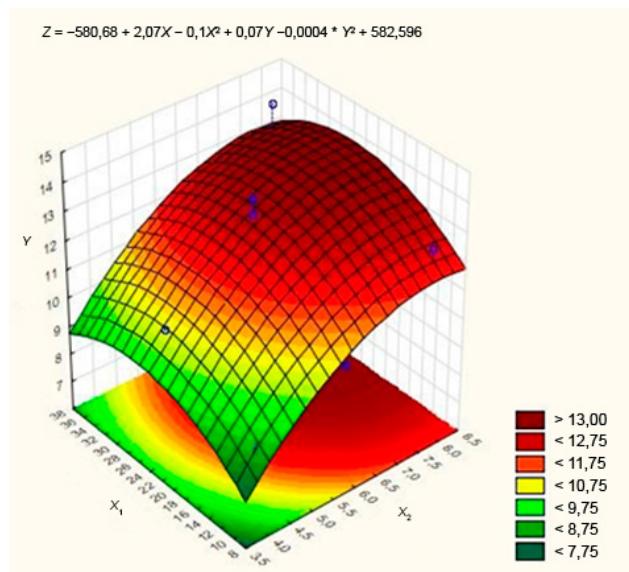


Рисунок 3. Поверхность отклика изменения титруемой кислотности (Y) молочной сыворотки в зависимости от активности фермента (X_1) и продолжительности ферментативного гидролиза (X_2)

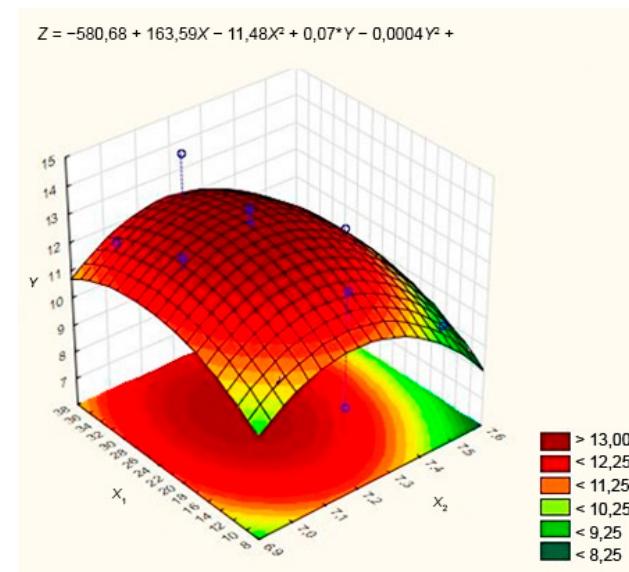


Рисунок 5. Поверхность отклика изменения титруемой кислотности (Y) молочной сыворотки в зависимости от активности фермента (X_1) и начального pH молочной сыворотки (X_2)

На рисунке 6 показано влияние начального pH молочной сыворотки и ферментативной активности препарата. Следует отметить, что максимальное значение аминного азота аминогрупп наблюдается при значениях pH 7,25 и ферментативной активности 25 000 ЕД.

На рисунке 7 представлена зависимость изменения аминного азота аминогрупп от начального значения pH и продолжительности ферментативного гидролиза. На рисунке представлена прямо пропорциональная зависимость между длительностью ферментативного гидролиза и начальным значением pH молочной сыворотке, при этом максимальное значение наблюдается при значении pH 7,25 и продолжительности ферментативного гидролиза 6–8 ч.

На рисунке 8 представлено изменение аминного азота аминогрупп в зависимости от продолжительности ферментативного гидролиза и ферментативной активности препарата. На рисунке проявляется линейная зависимость от продолжительности ферментативного гидролиза, и оптимальным является значение 6–8 ч, при этом ферментативная активность препаратов 25 000 ЕД и 36 000 ЕД позволяет получать практически идентичные значения аминного азота аминогрупп.

Таким образом, проанализировав графические зависимости на рисунках 1–8, можно констатировать, что оптимальные параметры ферментативного гидролиза молочной сыворотки находятся при начальном значении pH 7,25, времени ферментативного гидролиза 6–8 ч и ферментативной активности препаратов 25 000 ЕД и 36 000 ЕД.

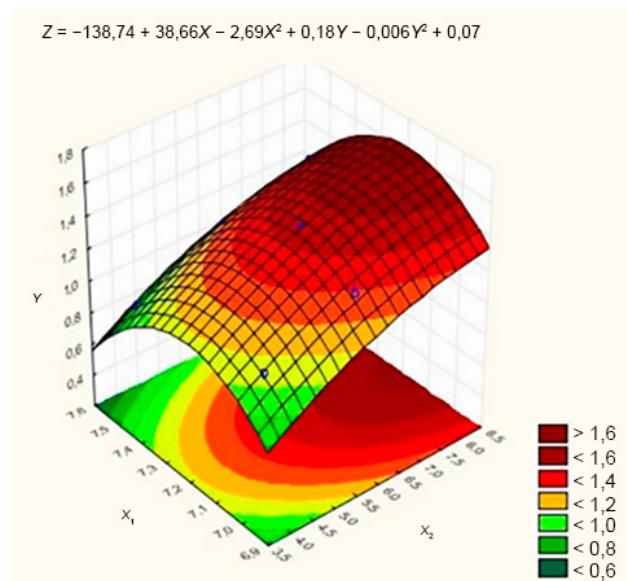


Рисунок 7. Поверхность отклика изменения концентрации аминного азота (Y) в зависимости от продолжительности ферментативного гидролиза (X_1) и начального pH молочной сыворотки (X_2)

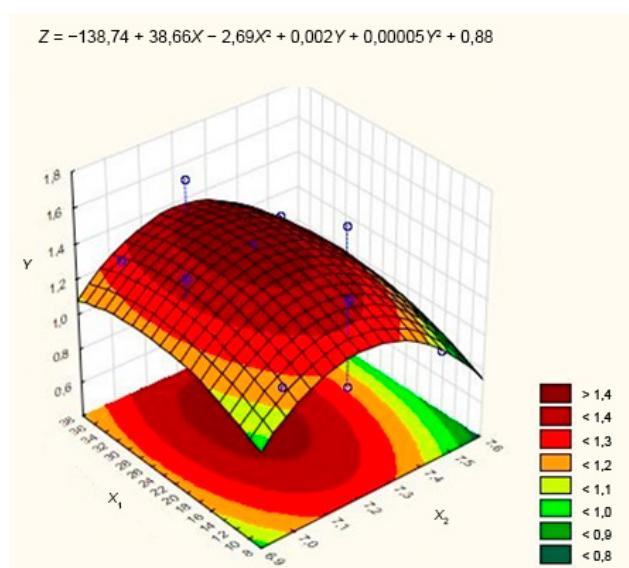


Рисунок 6. Поверхность отклика изменения концентрации аминного азота (Y) в зависимости от активности фермента (X_1) и начального значения pH молочной сыворотки (X_2)

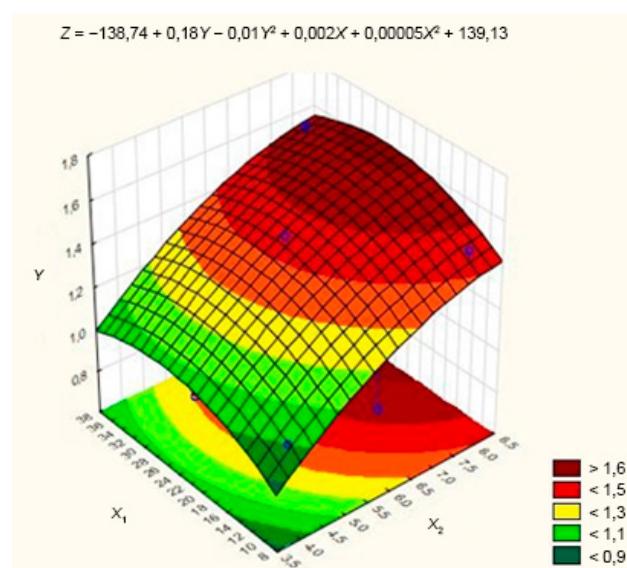


Рисунок 8. Поверхность отклика изменения концентрации аминного азота (Y) в зависимости от продолжительности ферментативного гидролиза (X_1) и активности фермента (X_2)

Это подтверждается и максимальными значениями аминного азота аминогрупп и кислотности сыворотки.

Учитывая результаты ранее описанных исследований и установленные оптимальные параметры ферментативного гидролиза сывороточных белков, нами были проведены эксперименты с использованием установки электрохимической активации. Молочную сыворотку нагревали до температуры 38–40 °С, выставляли значение pH 7,25, разделяли сыворотку на 3 равные части, затем вносили в нее фермент в количестве 0,1 % от объема сыворотки. В опытные образцы вносился фермент с активностью 25 000 ЕД и 36 000 ЕД, в качестве контроля использовался образец с внесением фермента с активностью 10 000 ЕД. Продолжительность ферментативного гидролиза составила 6 и 8 ч. После ферментативного гидролиза проводили электрофорез образцов с использованием прибора Experion Pro260, результаты представлены на рисунке 9.

Анализ полученных электрофореграмм показал, что наибольшее количество низкомолекулярных фракций белка содержится в образцах 3 и 4, полученных при следующих параметрах обработки: показатель pH молочной сыворотки – 7,25; активность фермента – 25 000 ЕД или 36 000 ЕД; продолжительность ферментативного гидролиза – 6 ч.

В этих же образцах (3, 4) содержится и меньше высокомолекулярных белков по сравнению с контролем. Это свидетельствует о том, что в образцах 3 и 4 прошел самый эффективный ферментативный гидролиз белков молочной сыворотки.

Выводы

Таким образом, с помощью электрохимической активации был усовершенствован процесс ферментативного гидролиза сывороточных белков. Данное улучшение связано с корректировкой pH молочной сыворотки для повышения эффективности ферментативного гидролиза. Также были определены оптимальные параметры ферментативного гидролиза молочной подсырной сыворотки: продолжительность ферментативного гидролиза – 6 ч, значение начального pH – 7,25, температура – 38–40 °С, активность фермента – 25 000 или 36 000 ЕД.

Изменения основных физико-химических характеристик используемого сырья, в т. ч. pH среды, наблюдаемые после процесса электрофизической обработки, указывают на эффективность использования электрохимической активации. Перспективным направлением является процесс ферментативного гидролиза молочной сыворотки путем электрохимической активации при установленной активности фермента, продолжительности его воздействия и оптимальном значении pH фермента. ■

Поступила в редакцию: 02.07.2025
Принята в печать: 15.10.2025

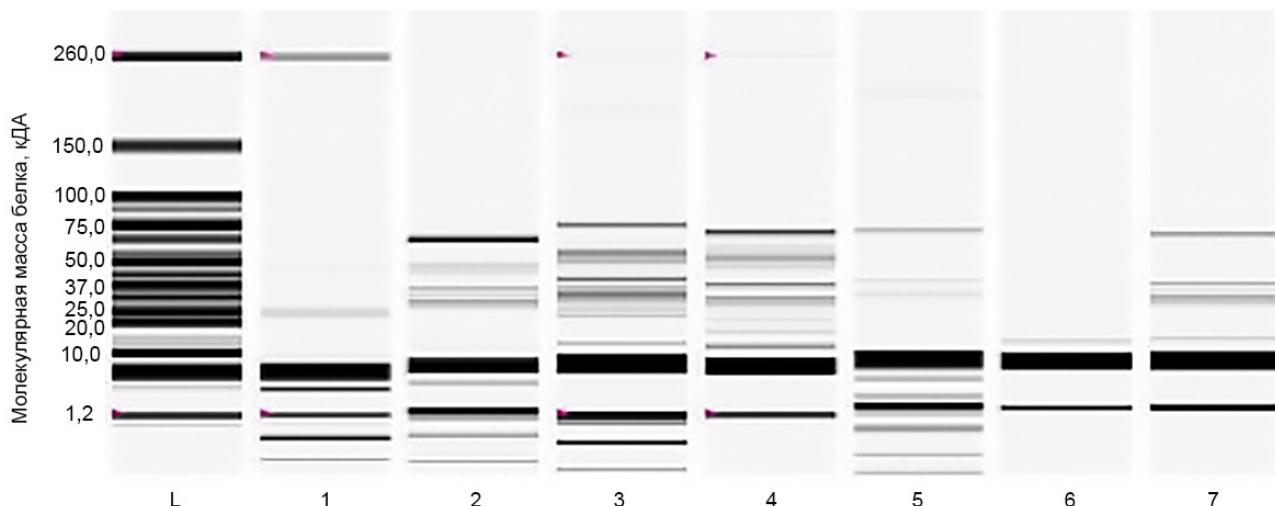


Рисунок 9. Электрофореграммы исследуемых образцов: L – стандарты молекулярных масс; 1 – контроль (сыворотка без ферментативного гидролиза); 2 – pH 7,25, 6 ч, 10 000 ЕД; 3 – pH 7,25, 6 ч, 25 000 ЕД; 4 – pH 7,25, 6 ч, 36 000 ЕД; 5 – pH 7,25, 8 ч, 10 000 ЕД; 6 – pH 7,25, 8 ч, 25 000 ЕД; 7 – pH 7,25, 8 ч, 36 000 ЕД

Biotechnology of Enzymatic Whey Hydrolysates with Fortified Amino Acid Composition

Ivan S. Rodionov, Ivan A. Evdokimov, Elena A. Abakumova, Egor E. Chumakov, Aleksey D. Lodygin, Dmitrii M. Nazarenko
North-Caucasus Federal University, Stavropol

Whey proteins are valuable components of functional drinks. Whey processing involves a wide range of technologies and products, e.g., whey protein enzymatic hydrolysis. The authors developed a new set of technological parameters of enzymatic hydrolysis. The research yielded new biotechnological principles for functional whey drinks based on electrochemical activation and enzymatic hydrolysis. Electrochemical activation affected the pH, degree, and time of enzymatic hydrolysis. The peptide profiles and the number of free amino groups in the samples of hydrolysed whey were studied using the Experion Pro260 system. Electrochemical activation intensified the hydrolysis and increased the effectiveness of hydrolytic enzymes. The optimal parameters of whey hydrolysis were as follows: pH 7.25, fermentation time – 6 h, temperature – 38–40 °C, enzyme activity – 25,000 units/mL and 36,000 units/mL. The resulting functional drinks were fortified with amino acids.

Keywords: whey, cheese whey, enzymes, pancreatin, enzymatic hydrolysis, transformation, electrochemical activation

Список литературы

1. Madureira, A. R. Bovine whey proteins – Overview on their main biological properties / A. R. Madureira [et al.] // Food Research International. 2007. Vol. 40(10). P. 1197–1211. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.005>
2. Varnam, A. H. Dairy Protein Products / A. H. Varnam, J. P. Sutherland // Milk and Milk Products. Ed. by A. H. Varnam, J. P. Sutherland. – Boston, MA: Springer US, 1994. – P. 159–182. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1813-6_4
3. Евдокимов, И. А. Вторичное молочное сырье в производстве функциональных продуктов / И. А. Евдокимов [и др.] // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 1. С. 116–119. <https://elibrary.ru/rruwxf>
4. Davoodi, S. H. Health-Related Aspects of Milk Proteins / S. H. Davoodi [et al.] // Iranian Journal of Pharmaceutical Research. 2016. Vol. 15(3). P. 573–591.
5. Aimutis, W. R. Bioactive properties of milk proteins with particular focus on anticariogenesis / W. R. Aimutis // The Journal of Nutrition. 2004. Vol. 134(4). P. 989S–995S. <https://doi.org/10.1093/jn/134.4.989S>
6. Kumar, R. Whey Proteins: A potential ingredient for food industry – A review / R. Kumar [et al.] // Asian Journal of Dairy and Food Research. 2018. Vol. 37(4). P. 283–290. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-1389>
7. Kosseva, M. Use of immobilised biocatalysts in the processing of cheese whey / M. R. Kosseva [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2009. Vol. 45(5). P. 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.09.005>
8. Panesar, P. S. Biotechnological approaches for the production of prebiotics and their potential applications / P. S. Panesar, S. Kumari, R. Panesar // Critical reviews in biotechnology. 2013. Vol. 33(4). P. 345–364. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.709482>
9. Mollea, C. Valorisation of cheese whey, a by-product from the dairy industry / C. Mollea [et al.] // Food Industry. Ed. by I. Muzzalupo. – IntechOpen, 2013. <https://doi.org/10.5772/53159>
10. Siso, M. I. G. The biotechnological utilization of cheese whey: A review / M. I. G. Siso // Bioresource Technology. 1996. Vol. 57(1). P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00036-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00036-3)
11. Korhonen, H. Bioactive peptides: Production and functionality / H. Korhonen, A. Pihlanto // International Dairy Journal. 2006. Vol. 16(9). P. 945–960. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.012>
12. Агаркова, Е. Ю. Белки молочной сыворотки как источник антиоксидантных пептидов / Е. Ю. Агаркова, К. А. Рязанцева, А. Г. Кручинин // Сыроделие и маслоделие. 2020. № 2. С. 57–58. <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2020-2-55-56>; <https://elibrary.ru/bqarsa>
13. Séverin, S. Milk biologically active components as nutraceuticals: Review / S. Séverin, X. Wenshui // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2005. Vol. 45(7–8). P. 645–656. <https://doi.org/10.1080/10408690490911756>
14. Токаев, Э. С. Современный опыт и перспективы использования препаратов сывороточных белков в производстве функциональных напитков / Э. С. Токаев, Е. Н. Баженова, Р. Ю. Мироедов // Молочная промышленность. 2007. № 10. С. 55–56. <https://elibrary.ru/ibqrnj>
15. Головач, Т. Н. Аллергенность белков молока и пути ее снижения / Т. Н. Головач, В. П. Курченко // Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2010. Т. 5, № 1. С. 9–55. <https://elibrary.ru/ibqrnj>
16. Tavano, O. L. Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology / O. L. Tavano // Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic. 2013. Vol. 90. Protein hydrolysis using proteases. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.01.011>
17. Chandrasekaran, M. Enzymes in Food and Beverage Production: An Overview / M. Chandrasekaran [et al.] // Enzymes in Food and Beverage Processing. Ed. by M. Chandrasekaran. – CRC Press, 2015. – Enzymes in Food and Beverage Production. P. 117–137. <https://doi.org/10.1201/b19408>
18. Бахир, М. В. Электрохимическая активация: история, состояние, перспективы / В. М. Бахир [и др.]. – М.: ВНИИИМТ, 1999. – 256 с.
19. Ferreira, S. L. C. Robustness evaluation in analytical methods optimized using experimental designs / S. L. C. Ferreira [et al.] // Microchemical Journal. 2017. Vol. 131. P. 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.12.004>
20. Dean, A. Response surface methodology / A. Dean, D. Voss, D. Draguljić // Design and analysis of experiments. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – P. 565–614. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0_16

**МОЛОЧНАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

**Подписка
на журнал**

podpiska.kemsu@mail.ru

