

ОТЗЫВ

Официального оппонента, доктора технических наук, Симоненко Сергея Владимировича на диссертационную работу Барковской Ирины Александровны на тему: «Разработка технологических решений для иммобилизации йода и цинка белковыми матрицами молочной сыворотки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 4.3.3 Пищевые системы (технические науки) и 4.3.5 Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

Актуальность темы исследования

В современных условиях приоритетного развития научно обоснованных стратегий профилактики микронутриентной недостаточности особое внимание уделяется созданию функциональных ингредиентов, обеспечивающих физиологически эффективную доставку жизненно необходимых элементов — таких как йод и цинк. Учитывая сохраняющуюся высокую распространённость йододефицитных состояний среди различных групп населения, а также роль цинка в обеспечении иммунной, эндокринной и когнитивной функции, становится очевидной необходимость поиска технологических решений, сочетающих биодоступность, стабильность и совместимость с пищевыми матрицами. В этом контексте молочная сыворотка и её белковые фракции представляют собой ценный биологический ресурс для создания таких систем.

Диссертационное исследование Барковской Ирины Александровны направлено на научно обоснованную разработку технологии, включающей последовательную модификацию белкового профиля молочной сыворотки, повышение аффинности белков к микроэлементам, частичный гидролиз и иммобилизацию йода и цинка. Заложенный в работе технологический подход демонстрирует высокий уровень интеграции современных методов мембранной фильтрации и ферментативной модификации белков с целью создания стабильного белково-минерального комплекса. Особенно значимо, что объектом исследования выбран широко доступный ресурс — молочная сыворотка, переработка которой остаётся актуальной задачей для молочной промышленности.

Таким образом, представленная диссертация отвечает актуальным задачам как в области нутрициологии и профилактической медицины, так и в технологической сфере, обеспечивая переход от теоретических представлений о биодоступности микроэлементов к практическим решениям для производства инновационных пищевых ингредиентов. Научная и прикладная ценность работы обусловлена сочетанием глубокой переработки вторичного сырья с решением важной проблемы общественного здоровья — нехватки йода в рационе населения.

Актуальность и достоверность положений, представленных в диссертации Барковской И.А., подтверждаются тщательной проработкой литературных источников, посвящённых проблеме йододефицита и существующим мировым подходам к его коррекции с использованием пищевых систем. Каждый из этапов экспериментального исследования в достаточной степени охарактеризован, сопровождается представлением репрезентативного массива данных и согласуется с выводами, полученными по итогам работы.

Заслуживает внимания и то, что результаты исследования прошли апробацию в условиях практического производства на предприятиях молочной промышленности, включая промышленные производства различного масштаба. Основные научные положения, выносимые на защиту, получили обсуждение в профильных кругах, что свидетельствует о заинтересованности отрасли в результатах работы и подтверждает прикладную значимость проведённого исследования.

Тема исследования Барковской И.А. и содержание диссертационной работы полностью соответствуют паспортам научных специальностей 4.3.3 Пищевые системы (технические науки) и 4.3.5 Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки).

Достоверность и новизна исследований и полученных результатов

Безусловность научной достоверности представленных результатов обеспечивается применением валидированных, широко апробированных в биотехнологических и пищевых исследованиях методик, а также корректной статистической обработкой экспериментальных данных, что позволяет объективно интерпретировать полученные эффекты на каждом этапе работы.

Научная новизна диссертационной работы Барковской И.А. заключается в разработке подхода к поэтапной трансформации белков молочной сыворотки, содержащего принципы биохимии, биотехнологии и новых «омиксных» технологий, для создания белково-минерального комплекса, содержащего йод и цинк в органической форме. Впервые установлен эффективный режим хелатирования ионов цинка с учетом варьирования соотношения β -лактоглобулина и α -лактальбумина в субстрате, обеспечивающее наибольшую степени связывания микроэлемента. Обоснована и апробирована на практике биоинформатическая стратегия гидролиза белков молочной сыворотки с сохранением хелатных комплексов цинка. Важным элементом новизны является определение параметров йодирования полученного гидролизата сывороточных белков с учетом физиологического соотношения микроэлементов. Полученные результаты открывают новые перспективы для создания специализированных пищевых продуктов для профилактики и нивелирования дефицита йода.

Оценка объема, структуры и содержания работы

Работа Барковской Ирины Александровны выполнена в полном соответствии с установленными требованиями ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Текст диссертации характеризуется традиционной структурой, включающей: введение, аналитический обзор литературы (глава 1), описание методологических основ исследования (глава 2), три главы, содержащие экспериментальные данные (главы 3–5), заключение, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка литературы, а также приложения. Работа отличается целостностью, завершенностью, обоснованной логикой построения и достаточным объемом представленных результатов.

Основной текст диссертации размещён на 138 страницах, включает 28 таблиц, 17 графических иллюстраций и 3 приложения. В библиографическом списке приведено 155 источников, в том числе 72 из зарубежных научных изданий.

Во введении автор последовательно обосновывает актуальность выбранного направления, формулирует цель и задачи исследования, отражает научную новизну и практическую значимость результатов, указывает на степень их апробации, участие в гранте РНФ № 24-26-00220 от 29.12.2023 г. по теме диссертационного

исследования, публикационную активность, а также наличие зарегистрированных программы для ЭВМ и актов промышленной апробации, подтверждающих внедрение разработанных технологий. Кроме того, соискатель включен в список победителей конкурсного отбора 2025 года на соискание стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, что также подтверждает актуальность исследования.

Первая глава содержит обстоятельный обзор состояния проблемы йододефицитных состояний, включая современные подходы к коррекции алиментарного дефицита эссенциальных микроэлементов. Рассматриваются используемые на сегодняшний день формы и носители йода в продуктах питания, их биодоступность и недостатки. Представлены научные предпосылки выбора белков молочной сыворотки в качестве перспективной матрицы для создания белково-минерального комплекса. Подчёркнуты структурно-функциональные свойства сывороточных белков и их потенциал в качестве агентов для связывания цинка и йода.

Во второй главе изложены общие принципы и стратегия проведения экспериментальных исследований. Подробно описаны объекты исследования и методы, применяемые для получения, обработки и анализа данных. Отражены принципы планирования экспериментов, математической статистики и биоинформатики, использованные в работе.

Третья глава посвящена оптимизации процесса термоселективного фракционирования белков молочной сыворотки, а также исследованию закономерностей хелатирования ионов цинка с модифицированным белковым профилем.

В разделе 3.1 рассмотрены параметры термоденатурации β -лактоглобулина и α -лактальбумина. Обоснована гипотеза, согласно которой хелаторы кальция способствуют обеспечению более мягких условий фракционирования, что позволяет сохранить функциональные свойства белка и увеличить выход α -лактальбумина.

Раздел 3.2 содержит анализ экспериментальных данных по динамике связывания цинка сывороточными белками с различным соотношением основных фракций. Эксперименты на модельных системах подтвердили, что повышение содержания α -лактальбумина ведёт к увеличению доли хелатной формы цинка, что

обусловлено присутствием высокоаффинных участков связывания двухвалентных металлов в его структуре.

Четвертая глава направлена на разработку технологических решений по управлению ферментативным гидролизом и йодированием белкового субстрата. Рассматривается влияние глубины гидролиза и условий йодирования на эффективность связывания йода и сохранность хелатного комплекса цинка.

В разделе 4.1 предложен алгоритм биоинформатического подбора протеаз с целью селективного гидролиза, способствующего сохранению ключевых сайтов связывания двухвалентных металлов и высвобождению реакционноспособных аминокислотных остатков для йодирования. По результатам анализа выбран панкреатический трипсин.

Раздел 4.2 посвящён оптимизации гидролиза модифицированного белкового субстрата и исследованию закономерностей йодирования в присутствии хелатного цинка. Предложена и подтверждена гипотеза о повышении доли органически связанного йода при предварительном контролируемом гидролизе. Установлены режимы биоконверсии, обеспечивающие сохранность хелатной формы цинка и эффективность связывания йода.

В разделе 4.3 подобраны режимы очистки белковых субстратов с применением мембранных технологий, позволяющие сохранить органические формы микроэлементов и удалить свободные формы йода и цинка.

Раздел 4.4 содержит анализ пептидного состава полученного обогащенного гидролизата. Автор идентифицировал 59 пептидов, в том числе 3 — йодированные по аминокислотным остаткам тирозина. Выявлены пептиды с известной биологической активностью, включая антимикробную и антидиабетическую, что расширяет перспективу их применения в функциональном и специализированном питании. На основании полученных данных представлена схема протеолитического процесса.

Пятая глава направлена на реализацию полученных научных разработок в прикладном аспекте. Приведены разработанные технологии получения сухого гидролизата сывороточных белков с органическими формами йода и цинка и обогащённого молока, а также их характеристики.

Раздел 5.1 содержит технологию производства белково-минерального ингредиента, регламентированную СТО 00419785-081/2-2024. Представлена зарегистрированная программа для ЭВМ, позволяющая моделировать йодирование белков с учётом параметров субстрата и технологических условий, для достижения требуемого баланса микроэлементов в готовом продукте.

Раздел 5.2 посвящён исследованию устойчивости микроэлементов к термическому воздействию при моделировании технологических процессов, характерных для молочной отрасли (гомогенизация, пастеризация, сквашивание). Приведена технология производства обогащённого пастеризованного молока в соответствии с СТО 00419785-081/2.1-2024.

Выводы четко структурированы и охватывают все задачи, сформулированные во введении. Результаты исследования достоверны, обоснованы и имеют прикладное значение.

Приложения содержат подтверждающие документы: свидетельство о регистрации Программы для ЭВМ, разработанную техническую документацию, а также материалы, подтверждающие проведение промышленной апробации на предприятиях.

Содержание автореферата полностью соотносится с основными результатами исследований.

Практическая значимость работы подтверждается регистрацией программы «Моделирование процесса йодирования белков молочной сыворотки» (свидетельство № 2025661267), разработкой технологий и документации в области стандартизации для двух новых видов обогащённых продуктов — сухого гидролизата и молока.

Апробация исследований

Барковской Ириной Александровной были доложены и обсуждены на 5 конференциях Всероссийского и Международного уровня основные полученные результаты исследования. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в международных рецензируемых журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science; 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК (К1-К2); 3 статьи в материалах конференций и журналах РИНЦ.

Замечания, вопросы и рекомендации по диссертации:

1. Следовало бы кратко, но четко изложить суть концепции направленной модификации белков молочной сыворотки, о которой говорится в «Заключении».
2. Полезно обсудить вопросы биодоступности и усвояемости разработанного гидролизата сывороточного белка в сравнении с аналогичными продуктами («Йодказеин», «Биойод», «Йодонорм») выделив различия. В диссертации данный аспект не акцентирован.
3. Необходимо пояснить, каким образом следует пользоваться формулами 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1 в части размерности и единиц измерения параметров.
4. Неясно, каким образом получены оптимальные значения параметров (сс. 47, 53, 71).
5. Рисунки 3.1, 3.2 имеют малую информативность. Целесообразно было бы кратко обсудить формы поверхностей отклика в контексте декларированной оптимизации условий термоденатурации.
6. Приведенная визуализация программы расчета необходимого количества молекулярного йода неудачна, так как, в конечном счете, неясна логика геометрического построения (рис. 5.1).
7. Неудачно выражение «... при нулевых значениях всех факторов» (табл. 3.2, 3.3, 3.6, 3.7, 4.3). Правильно: «в центре эксперимента».
8. Следовало бы дать определение понятия «биоинформатическое моделирование».
9. Полезно было бы выделить (по-возможности) пептиды, которые (по мнению автора) вносят основной вклад в формирование горечи в гидролизате.
10. В работе используется масса буквенных обозначений и аббревиатур, однако далеко не всем дана должная расшифровка.

Заключение

Представленные вопросы и замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Барковской Ирины Александровны. Актуальность, научная новизна и практическая значимость работы соискателя на тему: «Разработка технологических решений для иммобилизации йода и цинка белковыми матрицами молочной сыворотки» подтверждают полноценность научной квалификационной

Научно-исследовательский институт детского питания – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи». 143500, Московская область, г. Истра, ул. Московская, д. 48; <https://ion.ru/o-tsentre/struktura-tsentra/filial-nii-dp/>; 8-495-994-41-07; dir@niidp.ru.