

Методы получения и применение янтарной кислоты в пищевой промышленности: обзор предметного поля

О. О. Бабич¹, О. Б. Калашникова¹, Е. В. Ульрих², С. А. Сухих¹

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Российская Федерация

² Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Янтарная кислота является конечным метаболитом многих микроорганизмов. Она обладает антиоксидантными, тонизирующими свойствами, а также принимает участие в обменных процессах живого организма. Её применение в рецептуре продуктов питания будет способствовать расширению ассортимента функциональных продуктов питания, направленных на улучшения метаболизма.

Цель: описание методов получения и особенностей применения янтарной кислоты в пищевой промышленности для производства функциональных продуктов питания и биологически активных добавок к пище.

Материалы и методы: Поиск информации реализовывался в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, РИНЦ за период с 01.01.1994 г по 01.03.2024. Также были проанализированы отчеты о маркетинговых исследованиях в области использования янтарной кислоты в пищевой промышленности за период 2016-2023 гг. В обзор включены обзорные и эмпирические статьи, отвечающие критериям отбора, на английском и русском языках. Данный обзор предметного поля выполнен с опорой на протокол PRISMA-ScR.

Результаты: В настоящее время янтарную кислоту получают химическим или биотехнологическим методом. Наибольшую распространенность имеет химический метод (окисления парафинов, каталитического гидрирования, малеиновой кислоты или малеинового ангидрида). Существует также биотехнологический метод, основанный на культивировании микроорганизмов-продуцентов янтарной кислоты. Для культивирования микроорганизмов можно использовать различные органические субстраты, в том числе отходы пищевой промышленности. Показано, что янтарная кислота включена в список безопасных пищевых добавок и применяется при производстве пищевых продуктов в качестве регулятора кислотности. Однако в связи с тем, что она обладает доказанной биологической эффективностью янтарную кислоту можно включать в рецептуры различных пищевых продуктов, тем самым наделяя их дополнительно функциональными свойствами.

Выводы: Для внедрения биотехнологического метода в реальный сектор экономики необходимо решить ряд ограничительных факторов. Установлено, что янтарная кислота может быть использована не только в качестве традиционной пищевой добавки (регулятора кислотности), но и в качестве биологически активной добавки. Объемы производства и спроса янтарной кислоты медленно, но увеличиваются, что свидетельствует о необходимости внедрения новых технологий по производству янтарной кислоты для того, чтобы удовлетворить спрос на данный продукт.

Ключевые слова: янтарная кислота, клеточная инженерия, сукцинирование, функциональные продукты питания, пищевые добавки, здоровье человека

Корреспонденция:

Бабич Ольга Олеговна
E-mail: olich.43@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 30.11.2023

Доработана: 23.05.2024

Принята: 15.06.2024

Опубликована: 30.06.2024

Финансирование:

Статья выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 23-26-00091.

Copyright: © 2024 Авторы



Для цитирования: Бабич, О.О., Калашникова, О.Б., Ульрих, Е.В., & Сухих, С.А. (2024). Методы получения и применение янтарной кислоты в пищевой промышленности. *FOOD METAENGINEERING*, 2(2), 35-47. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.2.41>

Methods for obtaining and using succinic acid in the food industry: A Scoping Review

Olga O. Babich¹, Olga B. Kalashnikova¹, Elena V. Ulrich², Stanislav A. Sukhikh¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

² Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Succinic acid is the final metabolite of many microorganisms. It has antioxidant, tonic properties, and also takes part in the metabolic processes of a living organism. Its use in food formulations will help expand the range of functional food products aimed at improving metabolism.

Purpose: Description of methods for obtaining and features of the use of succinic acid in the food industry for the production of functional foods and biologically active food additives.

Materials and Methods: Information search was carried out in the databases Scopus, Web of Science, PubMed, RISC for the period from 01/01/1994 to 03/01/2024. Marketing research reports on the use of succinic acid in the food industry for the period 2016-2023 were also analyzed. The review included review and empirical articles that met the selection criteria in English and Russian. This review of the subject field is based on the PRISMA-ScR protocol.

Results: Currently, succinic acid is produced by chemical or biotechnological methods. The most common method is the chemical method (paraffin oxidation, catalytic hydrogenation, maleic acid or maleic anhydride). There is also a biotechnological method based on the cultivation of microorganisms that produce succinic acid. Various organic substrates, including food industry waste, can be used to cultivate microorganisms. It has been shown that succinic acid is included in the list of safe food additives and is used in food production as an acidity regulator. However, due to the fact that it has proven biological effectiveness, succinic acid can be included in the formulations of various food products, thereby providing them with additional functional properties.

Conclusion: To introduce the biotechnological method into the real sector of the economy, it is necessary to solve a number of limiting factors. It has been established that succinic acid can be used not only as a traditional food additive (acidity regulator), but also as a dietary supplement. The volumes of production and demand for succinic acid are slowly but increasing, which indicates the need to introduce new technologies for the production of succinic acid in order to meet the demand for this product.

Keywords: succinic acid, cell engineering, succinylation, functional foods, food additives, human health

Correspondence:

Babich Olga

E-mail: olich.43@mail.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 30.11.2023

Revised: 23.05.2024

Accepted: 15.06.2024

Published: 30.06.2024

Founding: The article was carried out with the financial support of the RGNF grant, agreement No. 23-26-00091.

Copyright: © 2024 The Authors



ВВЕДЕНИЕ

Янтарная кислота — это дикарбоновая кислота, имеющая широкий спектр применения, в частности, используется в качестве пищевой добавки в продуктах питания (Ahn, 2020). Янтарная кислота в организме оказывает многосторонний терапевтический эффект. Абсолютно доказано ее универсальное антигипоксическое, гепатопротекторное и антистрессовое действие (Степанова & Табаторович, 2010). Установлено адаптогенное действие янтарной кислоты при тяжелых физических нагрузках, имеются данные о стимулирующем действии янтарной кислоты на синтез белка, гемоглобина, усвоение глюкозы и синтез гликогена в печени. Показана важность применения янтарной кислоты в гериатрии и спортивном питании (Коваленко, 2000).

Янтарная кислота и ее соли разрешены для использования в пищевой промышленности для регулирования рН пищевых систем (пищевая добавка E363) (Столярская и соавт., 2021). Учитывая выраженное физиологическое воздействие янтарной кислоты на организм человека, представляется актуальным провести анализ современных исследований по методам получения и продуцентам янтарной кислоты, оценить важность роли янтарной кислоты как биологически активного компонента для получения пищевых продуктов, изучить информацию о расширении спектра ее использования в различных пищевых системах, а также провести оценку текущего состояния рынка янтарной кислоты в России и мире.

Несмотря на значительное количество публикаций о янтарной кислоте в последнее время (Iragavarapu, 2023, Ahn, 2020, Li, 2021, Gao, 2016, Li, 2019), существует много пробелов в изучении использования янтарной кислоты для получения пищевых продуктов.

Целью данного исследования являлось изучение методов получения и особенностей применения янтарной кислоты в пищевой промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Протокол и заявление о прозрачности исследования

Данный обзор предметного поля представляет собой прозрачный, точный и честный отчет о проведенном исследовании с использованием протокола PRISMA.

Критерии отбора

Объектами данного исследования являлись научные публикации российских и зарубежных авторов, касающиеся общих сведений, методов получения и особенностей применения янтарной кислоты в пищевой промышленности. В обзор предметного поля включены экспериментальные, обзорные статьи, доклады конференций, подходящие под критерии отбора. Критерии отбора в соответствии с мнемоникой Выборка, Концепция, Контекст (Population, Concept, Context) представлены в Таблице 1.

Решение о включении или исключении публикации в обзор предметного поля принималось авторами на основе представленных критериев. Дополнительным критерием отбора являлось наличие доступа к полному тексту статьи. В случае отсутствия такого доступа полный текст работы запрашивался у авторов, если авторы работ не предоставляли доступ к тексту, то работа исключалась из обзора.

Стратегия поиска

Для поиска информации были использованы базы данных Scopus, Web of Science, PubMed, РИНЦ за период с начала с 01.01.1994 г по 01.03.2024 г. Отобраны и проанализированы доступные обзорные и экспериментальные статьи по исследуемой тематике на английском и русском языках.

Для поиска информации об использовании янтарной кислоты в пищевой промышленности использовали следующие поисковые запросы: применение янтарной кислоты в пищевой промышленности, использование клеточной инженерии для получения янтарной кислоты, исследование процесса сукцинирования, янтарная кислота в функциональных продуктах питания, пищевые добавки на основе янтарной кислоты, влияние янтарной кислоты на здоровье человека; the use of succinic acid in the food industry, the use of cell engineering to obtain succinic acid, research on the succinylation process, succinic acid in functional foods, food additives based on succinic acid, the effect of succinic acid on human health.

Процесс отбора

В процессе отбора были исключены источники, не соответствующие критериям отбора. Исключению

Таблица 1

Критерии отбора источников

| Критерий | Включено | Исключено | Причины |
|------------------|--|--|--|
| Популяция | Микроорганизмы, продуцирующие янтарную кислоту | Микроорганизмы, не используемые в пищевой промышленности. Исследования, не затрагивающие развитие микроорганизмов, одним из метаболитов которых является янтарная кислота | Фокус исследования направлен на изучение микроорганизмов, продуцирующих другие метаболиты, или не пищевую янтарную кислоту |
| Концепция | Исследования, направленные на изучение особенностей роста микроорганизмов, продуцирующих янтарную кислоту. Ресурсы, изучающие рост таких микроорганизмов, или микроорганизмов, входящих в состав консорциума бактерий и грибов, продуцирующих янтарную кислоту | Исследования, направленные на изучение влияния активности микроорганизмов на концентрацию не пищевой янтарной кислоты в готовом продукте. Работы, фокусирующиеся на микроорганизмах, не входящих в состав консорциума, продуцирующего пищевую янтарную кислоту. Исследования, направленные только на изучение питательных сред для разработки продукта | Целью данного исследования является прояснение вопросов о культивировании микроорганизмов для способствования дальнейшим исследованиям по разработке продуктов с использованием янтарной кислоты |
| Контекст | Исследования, направленные на изучение продуктов пищевой промышленности | Исследования, направленные на изучение продуктов других отраслей. Работы о продуктах, изготовленных на не пищевой янтарной кислоте | Исследование сфокусировано на изучении работ, посвященных продуктам с использованием пищевой янтарной кислоты |
| Язык | Русский, английский | Все, кроме русского и английского | В связи с наибольшей доступностью статей о получении пищевой янтарной кислоты на русском и английском языках |
| Временной период | до 01.03.2024 | после 01.03.2024 | Статьи были ограничены по временному периоду с 1994 года, так как в литературных источниках до 1994 года не обнаруживаются опубликованные обзоры по заданной теме |
| География | Развитые и бурно развивающиеся страны | Страны со слаборазвитой экономикой, невысоким уровнем жизни | Янтарная кислота используется для производства продуктов функционального и специализированного питания в развитых и развивающихся странах |

подвергались и дубли статей. На первом этапе авторы сканировали заглавия. На втором этапе — аннотации. На третьем — реализовывали полно текстовое сканирование. После каждого из этапов нерелевантные источники отсеивались.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты поиска и процесс отбора

Из баз данных Scopus, Web of Science, PubMed, РИНЦ по первичному поисковому запросу были отобраны 246 потенциально приемлемых источника (Рисунок 1). Среди этих публикаций до начала исследований было исключено 16 публикаций: 6 — из-за отсутствия доступа к полному тексту после запроса у авторов, 10 — из-за жанра публикации (препринты не включались в обзор). Далее скринингу было подвергнуто 230 работы, 30 из которых были исключены как дублирующие.

Рисунок 1

Процедура отбора источников для составления обзора предметного поля по PRISMA-ScR



О. О. Бабич, О. Б. Калашникова, Е. В. Ульрих, С. А. Сухих

После анализа названий и аннотаций было исключено еще 86 исследований. В ходе дальнейшего скрининга полного текста статей, из 114 оставшейся статьи было исключено еще 57 как не подходящих под концепцию и цели данного обзора.

Извлечение и анализ данных

Большинство отобранных публикаций являлись экспериментальными исследованиями, опубликованными в период с 2006 по 2024 год (96,6% статей было опубликовано в последние 5 лет). Наибольшее количество работ было опубликовано в 2020 году — 37,9%.

В исследованиях принимали участие авторы из 16 стран. Наиболее активны исследователи из Китая, Южной Америки (Бразилия, Аргентина, Чили) и России. Большинство рассмотренных публикаций написаны на английском языке (91,0%), на русском (9,0%).

Методы получения и продуценты янтарной кислоты

В настоящее время известно два основных способа получения янтарной кислоты и ее производных (Рисунок 2).

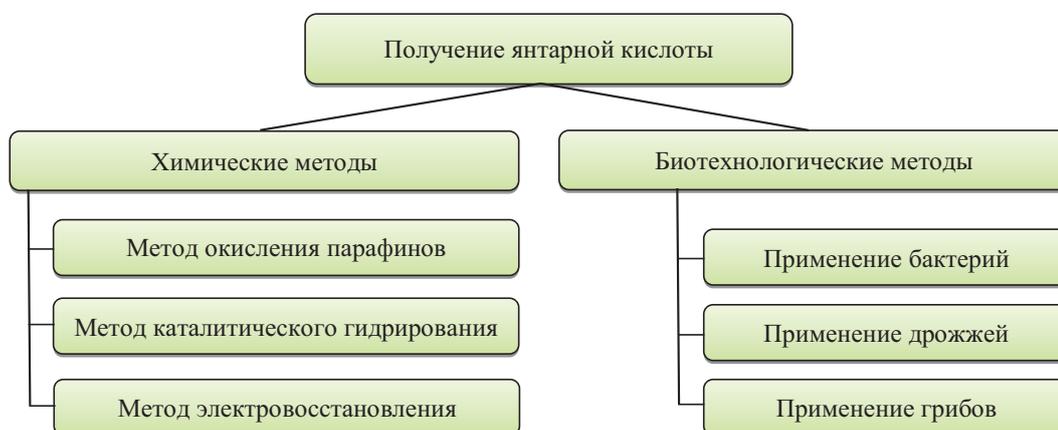
Процесс получения янтарной кислоты имеет значительную промышленную значимость, особенно с использованием химических методов. В качестве основного сырья часто применяют нефть и её производные, такие

как нефтяное масло и сжиженный нефтяной газ (Song, 2006). Для синтеза янтарной кислоты преимущественно используются методы окисления парафинов (Escanciano, 2022), каталитического гидрирования, а также электровосстановление малеиновой кислоты или малеинового ангидрида (Deng, 2023; Nghiem, 2017). В ходе окисления парафинов применяются катализаторы на основе кальция или марганца, а выделение и очистка продукта осуществляются методами перегонки, кристаллизации и сушки. Однако, как показывают исследования, выход и чистота янтарной кислоты, получаемой данным способом, остаются относительно низкими (Sadare, 2021).

Химические методы получения янтарной кислоты, несмотря на их экономическую эффективность, сталкиваются с рядом ограничений, включая рост цен на нефть и экологические проблемы, связанные с нефтяным производством (Song, 2006; Nghiem, 2017). Это стимулирует исследования альтернативных методов, в частности биотехнологического производства янтарной кислоты. Биотехнологический метод включает культивирование микроорганизмов, таких как *Actinobacillus succinogenes*, которые способны накапливать янтарную кислоту в условиях анаэробной ферментации (Thuy, 2017; Liu, 2022a; Liu, 2022b). Культуры *A. succinogenes* можно выращивать в средах, обогащенных различными органическими субстратами, включая молочную сыворотку, тростниковую мелассу и аграрные отходы, что демонстрирует их потенциал для использования широкого спектра углеродных источников (Wan, 2008; Zheng, 2009; Li, 2010).

Рисунок 2

Методы получения янтарной кислоты



Примечание. Deng, 2023; Nghiem, 2017; Thuy, 2017; Carvalho, 2016; Contreras-Ruiz, 2023; Show, 2015.

Технология мембранно-биореакторного процесса с последующим электродиализом, разработанная Kumar и соавторами (2020), позволяет получить высококонцентрированный раствор сукцината натрия с высоким выходом, что подчеркивает экономическую привлекательность этого метода. Также было исследовано использование *Corynebacterium crenatum* для производства янтарной кислоты в минеральной среде в анаэробных условиях (Chen, 2023).

Научные разработки также акцентируют внимание на использовании грибов и дрожжей, таких как *Aspergillus niger* и *Saccharomyces cerevisiae*, которые могут производить янтарную кислоту как побочный продукт метаболизма (Sadare, 2021; Contreras-Ruiz, 2023; Matthews, 2019; Escanciano, 2022). Прогресс в биотехнологических методах получения янтарной кислоты, несмотря на свои потенциальные экологические и экономические преимущества, сталкивается с ограничениями, связанными с сложностью процессов и высокими затратами на производство и очистку продукта. Возможное решение этих проблем предполагает разработку новых стратегий, направленных на смягчение ограничений, включая поиск новых микроорганизмов и генетическую модификацию существующих продуцентов (Mitrea, 2024).

Янтарная кислота как биоактивный ингредиент в пищевой промышленности

Янтарная кислота, включённая в список безопасных пищевых добавок в Европе и России, используется в рецептурах разнообразных пищевых продуктов, придавая им дополнительные функциональные свойства (Alexandri, 2022). Известно, что янтарная кислота обладает мно-

гочисленными терапевтическими эффектами. В частности, Lieshchova (2020) подтверждает, что янтарная кислота проявляет антигипоксическое, гепатотропное, антистрессовое действие, а также способствует адаптации организма при интенсивных физических нагрузках. Tosato (2022) установил, что янтарная кислота стимулирует синтез белка, гемоглобина и гликогена в печени, а также участвует в метаболизме глюкозы, проявляя инсулинотропный эффект на моделях сахарного диабета. Принимается во внимание также алкопротекторный эффект янтарной кислоты (Prabhu, 2020).

Янтарная кислота играет важную роль в энергообразующих процессах клетки, способствует утилизации кислорода и активации окислительно-восстановительных ферментных систем (He, 2021). Она оказывает положительное воздействие на процессы кроветворения, функционирование сердца и мозга, а также активирует метаболические процессы в центральной нервной системе (Sapozhnikova, 2022).

В пищевой промышленности янтарная кислота применяется как регулятор кислотности в производстве майонеза, соусов, десертов, суповых концентратов, а также в алкогольных и безалкогольных напитках (Prabhu, 2020). Сукцинат натрия используется как усилитель вкуса, предлагая альтернативу глутамату натрия, в то время как дилизинсукцинат служит усилителем солёного вкуса для продуктов с низким содержанием натрия (Yin, 2024). Примеры использования и роль янтарной кислоты подробно представлены в Таблица 2.

Абсолютная безвредность янтарной кислоты и ее солей, ее способность оказывать положительный эффект даже при весьма низких дозировках (10 мг/кг) делают ее весь-

Таблица 2

Критерии отбора источников

| Группа продуктов | Функциональное назначение |
|--|--|
| Алкогольные напитки | Антиоксическое воздействие, снижение абстинентного синдрома (БАД Янталак ГФ) |
| Майонезы, сухие напитки, супы, десерты, водка, пиво, вино, карамель, жевательная резинка | Регулятор кислотности и консервант |
| Изотонические напитки | Предотвращение обезвоживания, оптимизация водно-солевого баланса в организме человека |
| Напитки функционального назначения при вредных условиях труда | В качестве антидота (Выведение солей мышьяка, ртути, свинца, аммиака, нитратов и нитритов, токсинов) |
| Маргарин «Тонус 1» | Антиокислитель |
| Мармелад | Вкусовая и обогащающая добавка |
| Дрожжи прессованные хлебопекарные | Активация дрожжей, сокращение времени брожения |

Примечание. Составлено по Косинец, 2012; Prabhu, 2020

ма ценным компонентом при разработке нового поколения, так называемых «умных» лекарств, пищевых добавок (Косинец, 2012).

Текущее состояние рынка янтарной кислоты

Текущий объем мирового рынка янтарной кислоты остаётся относительно скромным, однако химически синтезированная янтарная кислота продолжает доминировать по сравнению с её биологическими аналогами. Это обусловлено, в первую очередь, меньшими финансовыми и капитальными затратами на её производство, стабильностью поставок сырья и регулярностью выпуска продукции. Согласно исследованию Mitrea (2024), рынок янтарной кислоты в 2021 году достиг 117,20 миллионов долларов США, а к 2022 году вырос до 171,34 миллиона долларов США. Предвидится, что к 2030 году рынок достигнет прибыльности в размере 272,4 миллиона долларов США, что отражает умеренные темпы роста.

По прогнозам, значительная доля химических веществ мирового спроса к 2025 году будет производиться из биологических источников, превышая 15% (Narisetty, 2022). Ожидается, что к 2025 году мировой рынок янтарной кислоты увеличится на 27,4% и достигнет объёма в 1,8 миллиарда долларов, что соответствует 768 миллионам тонн по цене 2,3 доллара за кг (Nghiem, 2017).

Рынок янтарной кислоты характеризуется высокой степенью конкуренции, обусловленной активной деятельностью транснациональных компаний (Таблица 3). Эти компании постоянно инвестируют в модернизацию производства и ведут активную научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу для улучшения технологий производства янтарной кислоты (Magalhães, 2021; Narisetty, 2022; Guo, 2022). Это подчёркивает стратегическую важность инноваций и улучшения производственных процессов в условиях ожесточённой конкуренции на мировом рынке.

Анализ аналитических данных позволил выявить, что основными странами производителями янтарной кислоты являются США, Мексика, Канада, Германия, Франция, Италия, Испания, Китай. Также наблюдается производ-

ство янтарной кислоты в таких странах как Турция, Саудовская Аравия, Бразилия, Аргентина, Индия, Австралия (Сок, 2014)¹. Согласно данным Таблице 3, страны Европы являются лидерами по производству янтарной кислоты.

В 2017 году объем рынка янтарной кислоты в России составил 332,54 тонны, а в 2018 году достиг значения 392,8 тонны, что на 4,2 % ниже объема рынка янтарной кислоты 2016 года. Объем рынка в 2020 году составил 405,60 тонн. Отмечено, что в 2023 году данный показатель незначительно снизился (Рисунок 3). В денежном эквиваленте Российский рынок янтарной кислоты в 2017 г достиг значения 937,62 тыс. долларов США, а в 2018 г превысил значения 1166,01 тыс. долларов США

Таблица 3

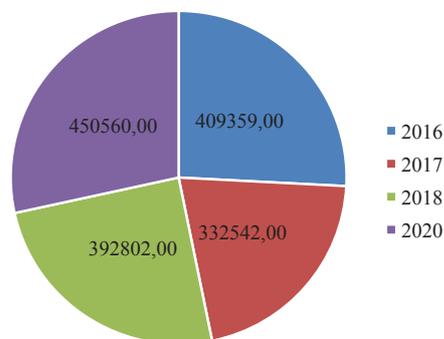
Основные производители янтарной кислоты

| Наименование компании | Страна |
|---------------------------------|---------|
| BioAmber, Mitsui | Канада |
| Reverdia | Италия |
| BASF, Purac | Испания |
| Kemira | Китай |
| HUGESTONE ENTERPRISE CO. LTD | Китай |
| PTT Public | Таиланд |
| Company Limited (Myriant) | США |
| Mitsubishi Chemical Corporation | Япония |
| LCY Biosciences | Канада |

Примечание. Составлено по Magalhães, 2021; Narisetty, 2022; Guo, 2022.¹

Рисунок 3

Объем рынка янтарной кислоты в России



Примечание. Из Сок, 2014²

¹ Succinic Acid Market by Type (Bio-based Succinic Acid, Petroleum-based Succinic Acid), End-Use Industry (Industrial, Food & Beverage, Coatings, Pharmaceutical) and by Region (North America, Europe, Asia Pacific, South America, Middle East and Africa) Global trends and forecasts from 2023 to 2029. Exactitude consultancy. <https://exactitudeconsultancy.com/ru/reports/19185/succinic-acid-market/>

² Succinic Acid Market by Type (Bio-based Succinic Acid, Petroleum-based Succinic Acid), End-Use Industry (Industrial, Food & Beverage, Coatings, Pharmaceutical) and by Region (North America, Europe, Asia Pacific, South America, Middle East and Africa) Global trends and forecasts from 2023 to 2029. Exactitude consultancy. <https://exactitudeconsultancy.com/ru/reports/19185/succinic-acid-market/>

О. О. Бабич, О. Б. Калашникова, Е. В. Ульрих, С. А. Сухих

Российский рынок янтарной кислоты преимущественно состоит из импорта. В 2017 г. на импорт пришлось 97,2% от всего объема отечественного рынка, при этом в 2017 году производство янтарной кислоты в России составило всего 10 025,8 кг, что в денежном эквиваленте составило 209,31 тыс. долларов США. В 2018 году объем производства янтарной кислоты в России составил 216,43 тыс. долларов США. Объем производства объекта изучения в 2020 году отечественными производителями составил 65,22 тыс. долларов США¹, при этом импорт янтарной кислоты в 14,7 раз превысил объем отечественного производства и составил 955,05 тыс. долларов США. По данным открытых источников лидером по импорту янтарной кислоты в Россию является Китай, который поставил ее в Россию в количестве 322 853 кг (41,0 % от общего объема импорта).

В ходе исследования установлено, что основными производителями янтарной кислоты в России являются ОАО «МАРБИОФАРМ» (г. Йошкар-Ола, Россия), АО «ХИМПЕАКТИВСНАБ» (г. Уфа, Россия), ООО «Полисинтез» (Белгород, Россия). Выявлено, что АО «Калининградский янтарный комбинат» наладил производство янтарной кислоты. В открытых источниках указано, что комбинат производит ее в количестве не более 200 кг в месяц (с учетом очистки ее в г. Санкт-Петербурге, Россия)².

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе данного исследования удалось достичь основной цели, определенной авторами: были изучены методы получения янтарной кислоты и особенности её применения в пищевой промышленности, а также выполнен анализ рынка янтарной кислоты в России и мире. Особое внимание уделено малоизученным аспектам, таким как развитие биотехнологических методов получения янтарной кислоты, которые традиционно оставались в тени химических методов, включая омыление динитрилов и окисление окси- и оксокислот, синтез сукцинатов из малоновой кислот, а также синтез симметрично замещённой янтарной кислоты и её эфиров через взаимодействие α-карбанионов (Зорин и соавт., 2016; Зорин, 2015).

На основании анализа литературных источников было установлено, что биотехнологические методы на сегодня

нышний день выходят на передний план. Это объясняется преимуществами биотехнологических процессов, которые осуществляются в более мягких условиях — при нормальном давлении и невысоких температурах, что приводит к меньшему загрязнению окружающей среды по сравнению с химическими методами (Mitrea et al., 2024; Liu et al., 2021; Li et al., 2021).

Современные исследования подтверждают, что бактерии, плесневые грибы и дрожжи способны эффективно синтезировать янтарную кислоту, что находит отражение в работах ведущих ученых (Liu et al., 2022; Gonzales et al., 2020). Наши результаты подтверждают, что идеальный биопроцент должен быть способен использовать разнообразные источники углерода и быть устойчивым к высокому осмотическому давлению, при этом не выделяя побочных продуктов. Одной из ключевых характеристик продуцента является концентрация синтезируемой кислоты в культуральной жидкости. Применение современных технологий генной инженерии открывает возможности для создания новых штаммов микроорганизмов и дрожжей с нужными характеристиками (Louasté and Eloutassi, 2020; Grimolizzi and Arranz, 2018; Wahl et al., 2017).

Исследуются и возможности использования янтарной кислоты в пищевой промышленности. Например, Романовым (2017) была усовершенствована рецептура мармелада путём добавления янтарной кислоты, что сделало продукт функциональным и полезным для адаптации и профилактики стрессов (Комаров, 2021; Табаторович, 2019). Исследования Столярской и соавт. (2021) показали возможности использования янтарной кислоты в соковой продукции.

Таким образом, янтарная кислота может быть использована не только как традиционная пищевая добавка, но и как биологически активная добавка, способствующая созданию новых продуктов питания функционального и специализированного назначения. Однако, исследование также выявило ограничения, связанные с преобладанием на российском рынке импортной продукции. Медленное увеличение объёмов производства и спроса на янтарную кислоту свидетельствует о необходимости внедрения новых технологий для удовлетворения растущего спроса. Планируется дальнейшее изу-

¹ Анализ рынка кислоты янтарной в России (с базой импорта-экспорта). <https://drgroup.ru/2388-analiz-rynka-yantarnoj-kisloty-v-Rossii.html>

² Анализ рынка янтарной кислоты в России. https://marketpublishers.ru/report/industry/chemicals_petrochemicals/analiz-rynka-yantarnoy-kisloty-v-rossii.html

О. О. Бабич, О. Б. Калашникова, Е. В. Ульрих, С. А. Сухих

чение и внедрение технологий для повышения выхода и ускорения процесса производства, с использованием экологически чистых «микробиофабрик». Стандартизация биотехнологической янтарной кислоты необходима для обеспечения стабильности её терапевтических свойств (Mitrea et al., 2024).

В конечном итоге, глобальный рынок янтарной кислоты, хотя и не характеризуется значительными объемами, демонстрирует высокую конкурентоспособность, что обусловлено активностью крупных транснациональных компаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Янтарная кислота, являясь органической кислотой, обладает значительным промышленным потенциалом, однако исследования в области безопасных методов её получения и применения в пищевых продуктах остаются недостаточными. Традиционно янтарная кислота производится на промышленных масштабах химическим способом из продуктов переработки нефти. Однако экологические ограничения, связанные с использованием нефтехимических процессов, ставят перед наукой задачу поиска альтернативных способов её синтеза. Биотехнологический метод получения представляется перспективным вариантом благодаря своей легкости в масштабировании и экологичности.

В пищевой промышленности янтарная кислота традиционно используется как регулятор кислотности в произ-

водстве майонезов, соусов, десертов, суповых концентратов, а также в алкогольных и безалкогольных напитках. Однако научные данные свидетельствуют о благоприятных биологических эффектах янтарной кислоты, что расширяет перспективы её применения для создания функциональных и специализированных пищевых продуктов.

Данные текущего обзора свидетельствуют о необходимости разработки инновационных стратегий производства янтарной кислоты на биологической основе. Такой подход позволит сделать процесс не только экологически устойчивым, но и технически, а также экономически эффективным. Последующие исследования должны сосредоточиться на разработке и оптимизации биотехнологических методов производства, а также на изучении новых областей применения янтарной кислоты в пищевой индустрии.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Бабич Ольга Олеговна: создание рукописи и её редактирование, администрирование проекта.

Калашникова Ольга Борисовна: формальный анализ.

Ульрих Елена Викторовна: методология, создание черновика рукописи.

Сухих Станислав Алексеевич: концептуализация, создание черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование, администрирование проекта.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Зорин, А.В., Зайнашев, А.Т., Чанышева, А.Р., & Зорин, В.В. (2015). Взаимодействие α -карбанионов ацилатов лития с 1,2-дибромэтаном. *Журнал органической химии*, 85(6), 914–917.

Zorin, A.V., Zaynashev, A.T., Chanysheva, A.R., & Zorin, V.V. (2015). Interaction of α -carbanions of lithium acylates with 1,2-dibromoethane. *Journal of Organic Chemistry*, 85(6), 914–917. (In Russ.)

Зорин, А.В., Чанышева, А.Р., & Зорин, В.В. (2016). Синтез янтарной кислоты и ее замещенных производных в реакциях α -карбанионов ацилатов с хлорацетатом

натрия. *Известия вузов. Химия и химическая технология*, 59(10), 19–23. <https://doi.org/10.6060/tcct.20165910.5399>

Zorin, A.V., Chanysheva, A.R., & Zorin, V.V. (2016). Synthesis of succinic acid and its substituted derivatives in reactions of α -carbanions of acylates with sodium chloroacetate. *ChemChemTech*, 59(10), 19–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/tcct.20165910.5399>

Коваленко, А.Л., & Белякова, Н.В. (2000). Янтарная кислота: фармакологическая активность и лекарственные формы. *Фармация*, 5–6, 40–43.

- Kovalenko, A.L., & Belyakova, N.V. (2000). Succinic acid: pharmacological activity and dosage forms. *Pharmacy*, 5-6, 40-43. (In Russ.)
- Комаров, А. А., Енгашев, С. В., Енгашева, Е. С., Удавлиев, Д. И., Егоров, М. А., Уша, Б. В., Селимов, Р. Н., & Гламаздин, И. Г. (2021). Амоксициллин и янтарная кислота: Эффективные лекарственные средства для защиты здоровья животных (обзор). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 98–117. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.259>
- Komarov, A. A., Engashev, S. V., Engasheva, E. S., Udavliev, D. I., Egorov, M. A., Usha, B. V., Selimov, R. N., & Glamazdin, I. G. (2021). Amoxicillin and succinic acid: Effective medicines for animal health protection (review). *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 4, 98-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.259>
- Косинец, В. А., Столбицкий, В. В., & Штурич, И. П. (2012). Опыт применения цитофлавина в спортивном питании. *Клиническая медицина*, 90(7), 56–59.
- Kosinets, V. A., Stolbitsky, V. V., & Shturich, I. P. (2012). Experience of using cytoflavin in sports nutrition. *Clinical Medicine*, 90(7), 56-59. (In Russ.)
- Романова, Н. К. (2017). Сукцинаты - перспективные добавки в технологиях продуктов из растительного сырья. *Вестник Казанского технологического университета*, 20(16), 128-132.
- Romanova, N. K. (2017). Succinates - promising additives in the technologies of products from plant raw materials. *Herald of Technological University*, 20(16), 128-132. (In Russ.)
- Сапожникова, Т. В., Сапожников, К. В., Парфенов, С. А., Елкин, А. А., Ризаханов, Д. М., & Ризаханова, О. А. (2022). Вегетативный и психический статус пациентов с функциональными заболеваниями ЖКТ. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*, 198(2), 159–168. <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-198-2-159-168>
- Sapozhnikova, T. V., Sapozhnikov, K. V., Parfenov, S. A., Elkin, A. A., Rizakhanov, D. M., & Rizakhanova, O. A. (2022). Vegetative and mental status of patients with functional gastrointestinal diseases. *Experimental & Clinical Gastroenterology Journal*, 198(2), 159-168. (In Russ.) <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-198-2-159-168>
- Степанова, Е.Н., & Табаторович, А.Н. (2010). Возможность использования янтарной кислоты в технологии производства мармелада. *Техника и технология пищевых производств*, 17(2), 1–6.
- Stepanova, E.N., & Taborovich, A.N. (2010). Possibility of using succinic acid in the technology of marmalade production. *Food Processing: Techniques and Technology*, 17(2), 1-6. (In Russ.)
- Столярская, Е.А., Соклаков, В.В., & Воротников, Б.Ю. (2021). Использование янтарной кислоты при производстве обогащённой соковой продукции из фруктов. *Вестник молодежной науки*, 2(29), 14.
- Stolyarskaya, E.A., Soklakov, V.V., & Vortnikov, B.Yu. (2021). The use of succinic acid in the production of enriched fruit juice products. *Bulletin of Youth Science*, 2(29), 14. (In Russ.)
- Табаторович, А. Н. & Резниченко И. Ю. (2019). Разработка и оценка качества диабетического желеиногo мармелада «Каркаде», обогащенного янтарной кислотой. *Food Processing: Techniques and Technology*, 49(2), 320–329. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-320-329>
- Ahn, J. H., Seo, H., Park, W., Seok, J., Lee, J. A., Kim, W. J., Kim, G. B., Kim, K.J., & Lee, S. Y. (2020). Enhanced succinic acid production by Mannheimia employing optimal malate dehydrogenase. *Nature Communications*, 11(1), 1970. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15839-z>
- Alexandri, M., Kachrimanidou, V., Papapostolou, H., Papadaki, A., & Kopsahelis, N. (2022). Sustainable food systems: The case of functional compounds towards the development of clean label food products. *Foods*, 11, 2796. <https://doi.org/10.3390/foods11182796>
- Carvalho, M., Roca, C., & Reis, M. A. (2016). Improving succinic acid production by *Actinobacillus succinogenes* from raw industrial carob pods. *Bioresource Technology*, 218, 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.140>
- Chen, C., & Zheng, P. (2023). New insights into the biosynthesis of succinic acid by actinobacillus succinogenes with the help of its engineered strains. *Fermentation*, 9(12), 1026. <https://doi.org/10.3390/fermentation9121026>
- Cok, B., Tsiropoulos, I., Roes, A. L., & Patel, M. K. (2014). Succinic acid production derived from carbohydrates: An energy and greenhouse gas assessment of a platform chemical toward a bio-based economy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(1), 16–29.
- Contreras-Ruiz, A., Alonso-del-Real, J., Barrio, E., & Querol, A. (2023). Saccharomyces cerevisiae wine strains show a wide range of competitive abilities and differential nutrient uptake behavior in co-culture with *S. kudriavzevii*. *Food Microbiology*, 114, 104276. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104276>

- Deng, W., Feng Y., Fu J., Guo H., Guo Y., Han B., Jiang Z., Kong L., Li C., Liu H., Nguyen P. T. T., Ren P., Wang F., Wang S., Wang Y., Wang Y., Wong S. S., Yan K., Yan N., Yang X., Zhang Y., Zhang Z., Zeng X. & Zhou H. (2023). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. *Green Energy & Environment*, 8, 1. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.07.003>.
- Escanciano, I. A., Wojtusik, M., Esteban, J., Ladero, M., & Santos, V. E. (2022). Modeling the succinic acid bioprocess: A review. *Fermentation*, 8(8), 368. <https://doi.org/10.3390/fermentation8080368>
- Gao, C., Yang, X., & Wang, H. (2016). Robust succinic acid production from crude glycerol using engineered *Yarrowia lipolytica*. *Biotechnol Biofuels*, 9, 179. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0597-8>
- Gonzales, T.A., de Carvalho Silvello, M.A., Duarte, E.R., Santos, L.O., Alegre, R.M., & Goldbeck, R. (2020). Optimization of anaerobic fermentation of *Actinobacillus succinogenes* for increase the succinic acid production. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 27, 101718.
- Grimolizzi, F., & Arranz, L. (2018). Multiple faces of succinate beyond metabolism in blood. *Haematologica*, 103(10), 1586.
- Guo, F., Wu, M., Zhang, S., Feng, Y., Jiang, Y., Jiang, W., Xin, F., Zhang, W. & Jiang, M. (2022). Improved succinic acid production through the reconstruction of methanol dissimilation in *Escherichia coli*. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 62. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00547-x>
- He, Y., Huang, W., Zhang, C., Chen, L., Xu, R., Li, N., Wang, F., Li, H., Yang, M., & Zhang, D. (2021). Energy metabolism disorders and potential therapeutic drugs in heart failure. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 11(5), 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2020.10.007>
- Iragavarapu, G. P., Imam, S. S., Sarkar, O., Mohan, S. V., Chang, Y. C., Reddy, M. V., Kim, S. H., Amradi, N. K., & Amradi, N. K. (2023). Bioprocessing of Waste for Renewable Chemicals and Fuels to Promote Bioeconomy. *Energies*, 16(9), 3873. <https://doi.org/10.3390/en16093873>
- Júnior, A. I. M., Soccol, C. R., Camara, M. C., Aulestia, D. T. M., de Souza Vandenberghe, L. P., & de Carvalho, J. C. (2021). Challenges in the production of second-generation organic acids (potential monomers for application in biopolymers). *Biomass and Bioenergy*, 149, 106092. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106092>
- Kumar, R., Basak, B., & Jeon, B. H. (2020). Sustainable production and purification of succinic acid: A review of membrane-integrated green approach. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123954. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123954>
- Li, C., Ong, K. L., Cui, Z., Sang, Z., Li, X., Patria, R. D., & Lin, C. S. K. (2021). Promising advancement in fermentative succinic acid production by yeast hosts. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123414.
- Li, C., Ong, K. L., Cui, Z., Sang, Z., Li, X., Patria, R. D., Qi, Q., Fickers, P., Yan, J., & Lin, C. S. K. (2021). Promising advancement in fermentative succinic acid production by yeast hosts. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123414. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123414>
- Li, C., Ong, K. L., Cui, Z., Sang, Z., Li, X., Patria, R. D., Qi, Q., Fickers, P., Yan, J., Lin, & C. S. K. (2021). Promising advancement in fermentative succinic acid production by yeast hosts. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123414. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123414>
- Li, C., Ong, K. L., Yang, X., & Lin, C. S. K. (2019). Bio-refinery of waste streams for green and efficient succinic acid production by engineered *Yarrowia lipolytica* without pH control. *Chemical Engineering Journal*, 371, 804–812. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.092>
- Li, Q., Siles, J.A. & Thompson, I.P. (2010). Succinic acid production from orange peel and wheat straw by batch fermentations of *Fibrobacter succinogenes* S85. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88, 671–678. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2726-9>
- Lieschova, M. A., Bilan, M. V., Bohomaz, A. A., Tishkina, N. M., & Brygadyrenko V.V. (2020). Effect of succinic acid on the organism of mice and their intestinal microbiota against the background of excessive fat consumption. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 11(2), 153–161. <https://doi.org/10.15421/022023>
- Liu, H., Song, Y., Fan, X., Wang, C., Lu, X., & Tian, Y. (2021). *Yarrowia lipolytica* as an oleaginous platform for the production of value-added fatty acid-based bioproducts. *Frontiers in Microbiology*, 11, 608662.
- Liu, J., Liu, J., Guo, L., Liu, J., Chen, X., Liu, L., & Gao, C. (2022). Advances in microbial synthesis of bioplastic monomers. In *Advances in Applied Microbiology* (vol. 119, pp. 35–81). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2022.05.002>
- Liu, X., Zhao, G., Sun, S., Fan, C., Feng, X., & Xiong, P. (2022). Biosynthetic pathway and metabolic engineering of succinic acid. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 843887. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.843887>

- Liu, X., Zhao, G., Sun, S., Fan, C., Feng, X., & Xiong, P. (2022). Biosynthetic pathway and metabolic engineering of succinic acid. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *10*, 843887.
- Louasté, B., & Eloutassi, N. (2020). Succinic acid production from whey and lactose by *Actinobacillus succinogenes* 130Z in batch fermentation. *Biotechnology Reports*, *27*, e00481.
- Matthews, C., Crispie, F., Lewis, E., Reid, M., O'Toole, P.W., & Cotter, P. D. (2019). The rumen microbiome: a crucial consideration when optimising milk and meat production and nitrogen utilisation efficiency. *Gut Microbes*, *10*(2), 115–132. <https://doi.org/10.1080/19490976.2018.1505176>
- Mitrea, L., Teleky, B. E., Nemes, S. A., Plamada, D., Varvara, R. A., Pascuta, M. S., Ciont, C., Cocean, A., Medeleanu, M., Nistor, A., Rotar, A., Pop, C. R., & Vodnar, D. C. (2024). Succinic acid—A run-through of the latest perspectives of production from renewable biomass. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25551>
- Mitrea, L., Teleky, B.-E., Nemes, S.-A., Plamada D., Varvara, R.-A., Pascuta, M.-S., Ciont, C., Cocean, A.-M., Medeleanu, M., Nistor, A., Rotar, A.-M., Pop, C.-R., & Vodnar, D.-C. (2024). Succinic acid — A run-through of the latest perspectives of production from renewable biomass. *Heliyon*, *10*(3), e25551. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25551>
- Narisetty, V., Okibe, M. C., Amulya, K., Jokodola, E. O., Coulon, F., Tyagi, V. K., Lens, P. N. L., Parameswaran, B., & Kumar, V. (2022). Technological advancements in valorization of second generation (2G) feedstocks for bio-based succinic acid production. *Bioresource technology*, *360*, 127513. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127513>
- Nghiem, N. P., Kleff, S., & Schwegmann, S. (2017). Succinic acid: technology development and commercialization. *Fermentation*, *3*(2), 26. <https://doi.org/10.3390/fermentation3020026>
- Omwene, P. I., Yağcıoğlu, M., Öcal-Sarihan, Z. B., Ertan, F., Keris-Sen, Ü. D., Karagunduz, A., & Keskinler, B. (2021). Batch fermentation of succinic acid from cheese whey by *Actinobacillus succinogenes* under variant medium composition. *3 Biotech*, *11*(8), 389. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02939-w>
- Perez-Zabaleta, M. (2019). *Metabolic engineering and cultivation strategies for recombinant production of (R)-3-hydroxybutyrate* [Unpublished doctoral dissertation]. KTH Royal Institute of Technology.
- Prabhu, A. A., Ledesma-Amaro, R., Lin, C. S. K., Coulon, F., Thakur V. K., & Kumar, V. (2020). Bioproduction of succinic acid from xylose by engineered *Yarrowia lipolytica* without pH control. *Biotechnol Biofuels*, *13*, 113. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01747-3>
- Sadare, O. O., Ejekwu, O., Moshokoa, M. F., Jimoh, M. O., & Daramola, M. O. (2021). Membrane purification techniques for recovery of succinic acid obtained from fermentation broth during bioconversion of lignocellulosic biomass: Current advances and future perspectives. *Sustainability*, *13*(12), 6794. <https://doi.org/10.3390/su13126794>
- Salma, A., Djelal, H., Abdallah, R., Fourcade, F., & Amrane, A. (2021). Platform molecule from sustainable raw materials; case study succinic acid. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *38*(2), 215–239. [ff10.1007/s43153-021-00103-8ff](https://doi.org/10.1007/s43153-021-00103-8ff)
- Shi, Y., Pu, D., Zhou, X., & Zhang, Y. (2022). Recent progress in the study of taste characteristics and the nutrition and health properties of organic acids in foods. *Foods*, *11*(21), 3408. <https://doi.org/10.3390/foods11213408>
- Show, P. L., Oladele, K. O., Siew, Q. Y., Zakry, F. A. A., Lan, J. C.-W., & Ling, T. C. (2015). Overview of citric acid production from *Aspergillus niger*. *Frontiers in Life Science*, *8*(3), 271–283. <https://doi.org/10.1080/21553769.2015.1033653>
- Song, H., & Lee, S. Y. (2006). Production of succinic acid by bacterial fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, *39*(3), 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.11.043>
- Thuy, N. T. H., Kongkaew, A., Flood, A., & Boontawan, A. (2017). Fermentation and crystallization of succinic acid from *Actinobacillus succinogenes* ATCC55618 using fresh cassava root as the main substrate. *Bioresource Technology*, *233*, 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.114>
- Tosato, M., Ciciarello, F., Zazzara, M. B., Pais, C., Saveria, G., Picca, A., Galluzzo, V., Coelho-Júnior, H. J., Calvani, R., Marzetti, E., Landi, F., & Gemelli A. (2022). Covid-19 post-acute care team. nutraceuticals and dietary supplements for older adults with long Covid-19. *Clinics in Geriatric Medicine*, *38*(3), 565–591. <https://doi.org/10.1016/j.cger.2022.04.004>
- Upton, D. J., McQueen-Mason, S. J., & Wood, A. J. (2017). An accurate description of *Aspergillus Niger* organic acid batch fermentation through dynamic metabolic modelling. *Biotechnology for Biofuels*, *10*, 258. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0950-6>
- Wahl, S. A., Bernal Martinez, C., Zhao, Z., van Gulik, W. M., & Jansen, M. L. (2017). Intracellular product recycling in high succinic acid producing yeast at low pH. *Microbial Cell Factories*, *16*, 1–13.
- Wan, C., Li, Y., Shahbazi, A., & Xiu, S. (2008). Succinic acid production from cheese whey using *Actinobacillus succinogenes* 130 Z. In *Biotechnology for fuels and chemicals*:

О. О. Бабич, О. Б. Калашникова, Е. В. Ульрих, С. А. Сухих

proceedings of the twenty-ninth symposium on biotechnology for fuels and chemicals (pp. 111–119). Humana Press.

Yin, G., Sun, Z., Wang, Z., Xia, Y., Cheng, L., Qin, G., Aschalew, N. D., Liu, H., Zhang, X., Wu, Q., Zhang, W., Zhao, W., Wang, T., & Zhen, Y. (2024). Mechanistic insights into inositol-mediated rumen function promotion and metabolic alteration using in vitro and in vivo models. *Frontiers in Veterinary Science*, *11*, 1359234. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1359234>

Zheng, P., Dong, J. J., Sun, Z. H., Ni, Y., & Fang, L. (2009). Fermentative production of succinic acid from straw hydrolysate by *Actinobacillus succinogenes*. *Bioresource Technology*, *100*(8), 2425–2429. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.043>