

АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ В СРАВНЕНИИ С ХЛОРИДОМ НАТРИЯ*

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Борис Владиленович Маневич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией санитарной обработки
E-mail: b_manevich@vnimi.org

Елена Александровна Бурыкина, младший научный сотрудник

Светлана Анатольевна Кишилова, младший научный сотрудник

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва

Статья посвящена поиску безопасных альтернативных методов дезинфекции в пищевой промышленности, направленных на минимизацию использования хлорсодержащих растворов, которые, несмотря на эффективность, способны генерировать токсичные побочные продукты. Цель работы – сравнительный анализ физико-химических показателей и антимикробной активности электрохимически активированных (ЭХА) растворов солей карбоновых кислот (ацетата, цитрата, лактата натрия) и электролизного раствора хлорида натрия с акцентом на безопасность и минимизацию экологических рисков. В ходе эксперимента использовали электролизную установку с диафрагменным электрохимическим модулем и 1 % растворы солей, подвергаемые электрохимической активации. Методика включала оценку окислительно-восстановительного потенциала, показателя активности водородных ионов (рН), содержания оксидантов в эквиваленте активного хлора и тестируирование бактерицидной эффективности *in vitro* в отношении тест-культуры *Pseudomonas aeruginosa* (штамм ATCC 25668 и резистентный штамм 47) при экспозиции 10 мин. Результаты показали, что ЭХА-раствор лактата натрия обеспечил снижение числа микроорганизмов на 4–6 lg KOE/cm³, менее эффективными оказались растворы ацетата и цитрата натрия, обеспечивающие снижение KOE на 3,9–4,9 lg KOE/cm³ и 3,4–4,0 lg KOE/cm³ соответственно, тогда как хлорид натрия – до 8 lg KOE/cm³ при исходном количестве клеток тест-культуры 8,0 и 8,2 lg KOE/cm³. Установлено, что электролиз монорасторов солей карбоновых кислот по механизму Кольбе не обеспечивает образования достаточного количества бактерицидных агентов и эффективных значений pH и окислительно-восстановительного потенциала. Обнаружена перспективность комбинирования солей карбоновых кислот с хлоридом натрия для синергетического усиления антимикробного эффекта при одновременном сокращении токсичных побочных продуктов. Подчеркнута важность оптимизации параметров электролиза (напряжение, сила тока, состав исходных растворов) для повышения эффективности. Результаты исследования могут быть применены при разработке экологически безопасных дезинфицирующих средств для пищевых предприятий, в том числе молокоперерабатывающих, соответствующих требованиям законодательства и стандартам пищевой безопасности.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, электрохимическая активация, соли карбоновых кислот, электролиз Кольбе, *Pseudomonas aeruginosa*, антимикробная активность, дезинфекция, токсичные побочные продукты

Для цитирования: Маневич, Б. В. Антимикробная активность электрохимически активированных растворов солей карбоновых кислот в сравнении с хлоридом натрия / Б. В. Маневич, Е. А. Бурыкина, С. А. Кишилова // Молочная промышленность. 2025. № 5. С. 68–76. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-5-59>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно действующим законодательным и нормативным документам, продовольственная безопасность является одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности страны. Указом Президента РФ № 20 от 21.01.2020 г. утверждена «Доктрина продовольственной безопасности», что свидетельствует о важности данного направления, неразрывно связанного с питанием населения и безопасностью пищевых продуктов. С изменениями и дополнениями от 01.01.2022 г. в России действует Федеральный закон № 29-ФЗ от 02.01.2000 г. «О качестве и безопасности пищевых продуктов»,

принятый Государственной думой. В соответствии с утвержденной «дорожной картой» Правительство РФ на законодательном уровне совершенствует систему обеспечения безопасности пищевых продуктов, опирающуюся, в свою очередь, на осуществление государственного надзора в области обеспечения качества и безопасности продуктов. Значимым элементом системы является проведение научных исследований в области средств и способов прерывания путей передачи эпидемических процессов и уничтожения микроорганизмов, передающихся посредством пищевой продукции на всех стадиях ее оборота на потребительском рынке¹.

* Материал подготовлен в рамках выполнения государственного задания по теме FNSS-2025-003

¹Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1516-р «О плане мероприятий («дорожной карте») по реализации положений Доктрины продовольственной безопасности РФ (с изменениями и дополнениями).

Санитарно-гигиенические и противоэпидемические мероприятия, осуществляемые на пищевых предприятиях, играют колossalную роль. Кроме человеческих потерь и потенциальной угрозы здоровью людей, связанных с болезнями пищевого происхождения, санитарно-гигиенические мероприятия позволяют предотвратить риски микробиологических загрязнений продуктов и избежать ощутимых экономических потерь².

По оценке Всемирной организации здравоохранения, ущерб от последствий пищевых отравлений оценивается в 95 млрд долл. в год³.

Кроме прямых финансовых потерь, связанных с отзывом продукции, штрафными санкциями, остановкой производств и разрывом логистических цепочек, присутствуют репутационные потери предприятий-производителей пищевой продукции. К примеру, эпидемическая вспышка листериоза (*L. monocytogenes*) в ЮАР в 2017–2018 гг., связанная с пищевым мясоперерабатывающим предприятием «Enterprise Foods», привела к 1060 зарегистрированным случаям, из которых 216 закончились летально, а экономический ущерб по некоторым оценкам составил около 160 млн долл. [1, 2]. Из последних случаев достаточно вспомнить вспышку ботулизма (*C. botulinum*) в Москве и ряде регионов России в июне 2024 г., при которой, по оценке Роспотребнадзора, пострадали по меньшей мере 417 человек с двумя летальными исходами⁴. На пищевых предприятиях дезинфекция является заключительным и зачастую важнейшим этапом санитарной обработки, влияющим на выпуск качественной и безопасной продукции [3]. Качество выпускаемых молочных продуктов напрямую связано с уровнем реализации санитарно-гигиенических мероприятий и, в особенности, эффективной и безопасной дезинфекции.

Разработка эффективных технологических решений, новых подходов, приемов и методов, связанных с интенсификацией процессов санитарной обработки, а также расширение номенклатуры дезинфицирующих средств с различным механизмом

воздействия на микробные клетки являются одними из приоритетных задач в области обеспечения пищевой безопасности. Несмотря на то что явление электролиза было открыто более двух столетий назад и около полувека используется в различных областях человеческой деятельности [4, 5], к применению электролизных растворов в процессах обеззараживания вновь наблюдается повышенный интерес, и в настоящее время их использование переживает «второе рождение» [6, 7]. Авторы многих публикаций относят использование электрохимически активированных растворов для целей дезинфекции к новым инновационным технологиям [8–10].

Для получения электрохимически активированных растворов, в частности активных хлоркислородных анолитов, обладающих обеззараживающими и дезинфицирующими свойствами, в качестве исходных растворов, подвергаемых электролизу, чаще всего используют растворы хлорида натрия (NaCl), реже – смеси хлорида калия (KCl) и хлорида магния (MgCl₂) [5, 6]. В процессе электролиза растворов хлорида натрия в зависимости от конструкции реактора, концентрации исходного раствора, физико-химических свойств воды, материала электродов, температуры и времени, напряжения и силы тока в анолите образуются активные вещества. Среди них: смесь хлоркислородных и пероксидных соединений, содержащих хлорноватистую кислоту (HOCl), диоксид хлора (ClO₂), гипохлорит-ионы (ClO⁻), синглетный молекулярный кислород (O₂), анион пероксида (HO₂⁻) и др. [6, 10]. Эти растворы анолитов обладают широким спектром антимикробного действия [5, 6, 11] и применяются для обеззараживания в медицине, ветеринарии, пищевой, в том числе молочной, промышленности и других областях [12, 13]. Генерация электрохимически активированных (ЭХА) растворов характеризуется технологической простотой процесса, низкой стоимостью получаемых растворов анолитов и католитов, эффективностью в качестве средств санитарной обработки. Вместе с тем основным активно действующим веществом, получаемым в процессе электролиза, является хлорноватистая кислота, которая обла-

² В Европе в результате пищевого отравления ежегодно умирает почти 5 тысяч человек [Электронный ресурс]. URL: <https://news.un.org/ru/story/2019/06/1356731> (дата обращения 12.04.2025).

³ ФАО, ЮНЕП, ВОЗ и ВООЗЖ. 2023. Совместный план действий «Единое здоровье» (2022–2026 годы).

Совместная работа по устранению угроз здоровью людей, животных, растений и окружающей среды. Рим [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.4060/cc2289ru> (дата обращения 12.04.2025).

⁴ Глава Роспотребнадзора Анна Попова выступила на заседании Комитета Госдумы по охране здоровья: ситуация с ботулизмом в РФ в 2024 году [Электронный ресурс]. URL: https://pharmcontrol.ru/news_rossotrebnadzor.php?id=3838/%20%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9 (дата обращения 12.04.2025).

дает рядом недостатков: коррозионная активность, нестабильность и опасность образования токсичных хлорогранических соединений [15, 16]. Для пищевых предприятий существенным негативным фактором при получении и использовании ЭХА-растворов анолитов, содержащих гипохлориты, хлорноватистую кислоту и различные хлор-кислородные соединения, является потенциальное образование в процессах проведения дезинфекции канцерогенных и мутагенных галогенированных побочных продуктов – хлораминов, хлороформа и других тригалометанов (дихлорбромметана, трибромметана), представляющих угрозу для здоровья человека и окружающей среды [16, 17]. Возможность минимизировать неблагоприятные показатели ЭХА-растворов, особенно потенциальное образование токсичных побочных продуктов с применением альтернативных исходных компонентов, представляется актуальной задачей.

Соли многих карбоновых кислот (в частности, ацетаты, цитраты, лактаты) сами по себе обладают выраженным антимикробными свойствами и широко используются в пищевой промышленности в качестве безопасных консервантов и антимикробных агентов. Рядом исследователей приводятся данные, свидетельствующие о том, что натриевые соли карбоновых кислот обладают более выраженным противомикробными свойствами по отношению к распространенным в пищевой промышленности патогенным микроорганизмам, чем калиевые соли [18], а их окисление в процессе электролиза может привести к образованию новых антимикробных агентов (например, хлорацетатов).

В результате проведенного поиска в базах данных и научных статьях встречаются публикации о проведении электроактивации водных растворов солей слабых органических кислот, не содержащих хлора, и получении безопасных и высокоактивных растворов [19, 20]. Электроактивация водных растворов ацетата калия, цитрата калия и лактата кальция показала большую эффективность и значительную антимикробную активность ЭХА-растворов по отношению к эмерджентному патогену *E. coli* штамм O157:H7, чем соответствующие карбоновые кислоты: уксусная, лимонная и молочная [20].

Исследования Р. Е. Cayemitte et al. [21] показали, что электроактивированные растворы лактата кальция, аскорбата кальция и их эквимолярные смеси, не содержащие хлора, показали высокую антимикробную активность.

Результаты исследований V. Liato et al. продемонстрировали антибактериальную активность электроактивированных растворов солей слабых органических кислот в отношении *Salmonella enterica*, *Staphylococcus aureus* и *Listeria monocytogenes*, позволяющую ингибировать микроорганизмы через 10 мин. воздействия со снижением количества бактерий на ≥ 6 порядков КОЕ/см³ [22]. Электроактивированные растворы ацетата натрия и пропионата натрия показали высокую эффективность в отношении *St. avermitilis* и могут стать альтернативой хлорсодержащим дезинфицирующим средствам [23].

Электролиз карбоновой кислоты в 1834 г. описал М. Фарадей [24], а спустя 13 лет Г. Кольбе определил и описал конечные продукты электролиза уксусной и валерьяновой кислот [25]. Центральной реакцией в электроорганическом синтезе, характеризующей основной механизм электролиза карбоновых кислот (в том числе уксусной, лимонной и молочной) и их солей, является электролиз Кольбе [26]. Упрощенно электролиз по Кольбе показан на рисунке 1, который можно прокомментировать следующим образом: на катоде в процессе электролиза выделяется молекулярный водород и образуется щелочь (например, гидроксид натрия), а на аноде происходит выделение углекислого газа и образование соответствующего алкана как продукта разложения аниона карбоновой кислоты.

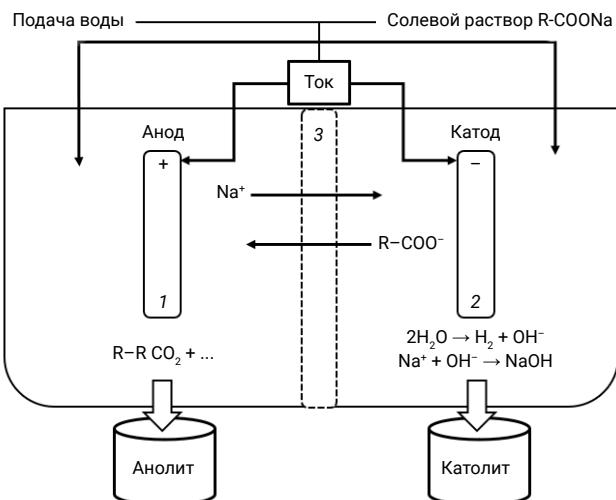
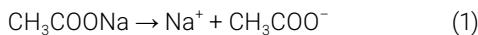
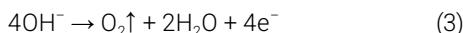


Рисунок 1. Схема электрохимической ячейки, используемой для получения ЭХА-растворов солей карбоновых кислот: 1 – инертный анодный электрод из титана с платиновым покрытием; 2 – инертный катодный электрод из титана; 3 – полупроницаемая керамическая мембрана

Диссоциация при электролизе водного раствора ацетата натрия (уксуснокислого натрия, пищевой добавки Е262) проходит следующим образом:



Соответственно, в растворе будут ионы натрия Na^+ , водорода H^+ ; ацетат-ионы CH_3COO^- и гидроксид-ионы OH^- . В катодной зоне раствор становится щелочным и образуется газообразный водород (H_2), и в то же время в анодной зоне (при умеренном напряжении) происходит накопление и окисление гидроксид-ионов:



а при высоком напряжении или высокой концентрации ацетата возможна альтернативная реакция окисления ацетат-ионов:



При окислении воды на аноде образуется кислород O_2 , а при окислении ацетата – углекислый газ CO_2 и ионы водорода H^+ с возможным получением «побочных» органических продуктов (например, метана – CH_4 , ацетальдегида – $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$). В зоне у катода получаем католит с гидроксидом натрия, щелочной реакцией (рН) среды и выделением газообразного водорода H_2 . В анодной зоне, в зависимости от условий, выделяется кислород O_2 или CO_2 , а у анолита снижается рН в кислотную среду. При окислении ацетата образуется углекислый газ (CO_2), который растворяется с образованием угольной кислоты H_2CO_3 , также возможно получение органических кислот и промежуточных продуктов разложения ацетата.

При рассмотрении антимикробных свойств анолитов, полученных в результате электролиза солевых растворов, необходимо отметить такие их важные физико-химические характеристики, как показатель активности водородных ионов (рН), окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и наличие активного действующего вещества – антимикробного агента.

Отклонения от предпочтительных для конкретных микроорганизмов значений рН существенно дестабилизируют их жизнедеятельность: нарушают метаболизм, повреждают мембранны клеток, усиливают токсичность воздействия химических

соединений, а экстремальные значения рН могут не только подавлять рост, но и вызывать гибель клеток [5, 27]. По мнению исследователей, показатель ОВП, называемый также редокс-потенциалом, играет наиважнейшую роль с точки зрения прогнозирования дезинфицирующего потенциала анолита, чем содержание активного хлора в растворе, получаемом при электролизе растворов хлорида натрия [5, 28]. В случае электрохимической активации растворов солей карбоновых кислот представляет интерес потенциальная возможность использования анолитов в качестве антимикробных препаратов. В качестве гипотезы выдвигается предположение, что электролизные растворы натриевых солей карбоновых кислот после активации проявят антимикробные или дезинфицирующие свойства по отношению к чистой культуре грамотрицательной *Pseudomonas aeruginosa* (штаммы ATCC 25668 и 47) с перспективой получения анолитов с улучшенными физико-химическими и бактерицидными параметрами.

Цель исследования – оценка антимикробных свойств электрохимически активированных растворов анолитов, полученных в результате электролиза растворов ацетата, цитрата и лактата натрия по отношению к условно-патогенной культуре *Pseudomonas aeruginosa*.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в лаборатории санитарной обработки ФГАНУ «ВНИМИ» с использованием оборудования Центра коллективного пользования Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ЦКП ВНИМИ).

В ходе исследований были проанализированы доступные исследовательские и обзорные статьи по антимикробным и дезинфицирующим свойствам электрохимически активированных растворов солей карбоновых кислот в русско- и англоязычной научной литературе, найденной в библиографических базах данных и научных электронных библиотеках: Science Direct, PubMed, Google Scholar, Springer, eLIBRARY.RU, РИНЦ с предпочтением публикаций за период с 2020 по 2025 г. В качестве поисковых запросов использовали следующие ключевые слова и словосочетания: электролиз, электроактивированные растворы, соли органических карбоновых кислот, антимикробная активность, дезинфицирующие свойства.

Объектами исследований являлись: электрохимически активированные растворы анолитов, получаемые при электролизе водных растворов ацетата, цитрата, лактата и хлорида натрия; условно-патогенные тест-микроорганизмы *P. aeruginosa* (*P. aeruginosa* ATCC 25668 и высоко-резистентный штамм 47, выделенный в производственной среде). Реактивы, используемые в исследовании, были не ниже квалификации ХЧ и ЧДА со степенью чистоты не менее 99 %, исключение составлял лактат натрия (натрий молочнокислый пищевой, Е325, производство Китай) с содержанием основного вещества 57–66 % (фактически – 60,1 %).

В экспериментах использовали лабораторную установку для электрохимической обработки воды и водных растворов «АКВАТРОН», оснащенную одним диафрагменным электрохимическим реактором-модулем В. М. Бахира «МБ-11Т», с титановыми электродами и платиновым покрытием анода. В данной модели используется гидравлическая схема, обеспечивающая оптимальные скорости протока и объемную плотность тока в электродной камере элемента «МБ-11Т», способствующая возникновению в ней интенсивных радиальных вихрей с эффективным энерго-массо-переносом. Производительность установки (реактора) по анолиту / католиту 5–20 л/ч; диапазон pH 1,0–14,0. Подача исходного раствора (или воды) осуществляется встроенными насосами анодного и катодного контуров. Внешний вид установки представлен на рисунке 2а. Напряжение и силу тока регулировали и измеряли с помощью внешнего источника питания Maisheng Power Supply MP3030D (30 В, 30 А), внешний вид которого представлен на рисунке 2б.

Показатель активности водородных ионов (pH) определяли потенциометрическим методом по ГОСТ 32385-2013 «Товары бытовой химии».



Рисунок 2. Внешний вид: а) лабораторной установки «АКВАТРОН» для электрохимической обработки воды и водных растворов; б) внешнего источника питания Maisheng Power Supply MP3030D



Источник изображения: freepik.com

Метод определения показателя активности водородных ионов (pH) с помощью pH-метра Hanna instruments HI991001 с электродом HI1296D.

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) определяли электрохимическим методом на приборе pH-150 МИ с использованием стеклянного электрода с red-ox функцией относительно стандартного водородного электрода. Содержание окислителей в эквиваленте активного хлора в получаемых электрохимически активированных растворах анолитов определяли методом йодометрического титрования по ГОСТ Р 57001-2016 «Дезинфектология и дезинфекционная деятельность. Химические дезинфицирующие средства и антисептики. Метод определения содержания активного хлора».

Для сравнительной оценки антимикробных свойств ЭХА-растворов натриевых солей карбоновых кислот (уксусной, лимонной и молочной) по отношению к тест-культуре *P. aeruginosa* (штаммы ATCC 25668 и 47) были проведены эксперименты *in vitro* при экспозиции 10 мин. и температуре 22 ± 1 °C. Исследования проводили в соответствии с руководством Р 4.2.3676-20 «Методы лабораторных исследований и испытаний дезинфекционных средств для оценки их эффективности и безопасности» п. 3.2.3.1 суспензионным методом, предусматривающим ежедневный (трехкратный) пересев на питательные среды при отсутствии роста тест-культуры в пробирке, используя в качестве нейтрализатора стерильный универсальный раствор (ГОСТ Р 58151.4-2018), содержащий: Твин-80 3,0 %, сапонин 0,5 %, гистидин 0,1 %, цистеин 0,1 %, тиосульфат натрия 2,0 %. Исходный титр тест-культуры *P. aeruginosa* (штаммы ATCC 25668 и 47) – 10⁸ КОЕ/см³. В качестве питательной среды использовали плотную питательную среду SPS (СПА).

Все результаты представлены по данным трех независимых экспериментов (повторов). Результаты представляли как среднее значение \pm стандартное отклонение ($M \pm m$). Для обработки полученных данных использовали стандартные статистические методы. Данные подвергали дисперсионному анализу (ANOVA) с применением Minitab Statistical Software. Построение диаграмм осуществляли с применением программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для электрохимической активации готовили исходные водные растворы ацетата, цитрата, лактата и хлорида натрия с массовой долей 1 % основного вещества. Для приготовления использовали водопроводную воду с показателем $\text{pH} = 7,0 \pm 0,2$ и значением окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) = $+230 \pm 12$ мВ. Несмотря на то, что водопроводная вода по сравнению с дистиллированной обладает повышенной минерализацией и наличием в ней металлов (железа, магния, кальция и др.), влияющих на физико-химические свойства получаемых ЭХА-растворов анолитов [29], было принято решение пре-небречь разницей получаемых значений, поскольку в реальных производственных условиях на подавляющем большинстве предприятий для приготовления рабочих растворов используют водопроводную воду. Обычно значение ОВП водопроводной воды колеблется от +100 до +300 мВ и зависит от состава воды, способов ее обработки и состояния труб.

Температура водно-солевых исходных растворов, подвергаемых электролизу, составляла 18 ± 1 °C. В процессе электролиза реактор подвергался принудительному охлаждению проточной водой температурой 13 ± 1 °C. Объемная подача исходных растворов проточным методом в реактор «МБ-11Т» составляла $Q = 9,6 \pm 0,1$ л/ч. Электрическое напряжение (постоянного тока) на данном этапе исследования составляло $U = 5,01 \pm 0,01$ В; сила тока (I , А) для каждого конкретного рассматриваемого исходного раствора указана в таблице.

Таблица. Показатели исходных и электрохимически активированных растворов

Исходный раствор, pH	Сила тока (I , А)	Показатели анолита		Показатели католита	
		pH	ОВП, мВ	pH	ОВП, мВ
Ацетат натрия (1 %), $\text{pH} = 8,6 \pm 0,3$	$0,55 \pm 0,05$	$6,5 \pm 0,2$	$+244 \pm 9$	$9,9 \pm 0,1$	-212 ± 6
Цитрат натрия (1 %), $\text{pH} = 8,6 \pm 0,2$	$0,74 \pm 0,06$	$6,8 \pm 0,2$	$+147 \pm 6$	$10,4 \pm 0,2$	-294 ± 5
Лактат натрия (1 %), $\text{pH} = 8,4 \pm 0,2$	$0,78 \pm 0,02$	$6,2 \pm 0,1$	$+118 \pm 4$	$10,3 \pm 0,2$	-368 ± 7
Хлорид натрия* (1 %), $\text{pH} = 7,1 \pm 0,1$	$1,49 \pm 0,05$	$2,8 \pm 0,3$	$+1106 \pm 14$	$11,2 \pm 0,3$	-859 ± 9

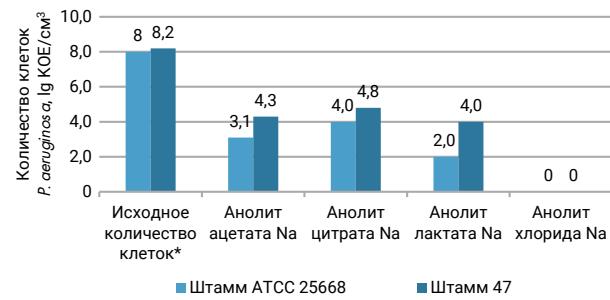
Примечание: * – содержание окислителей в эквиваленте активного хлора ЭХА-раствора анолита, полученного в результате электролиза 1 % водного раствора хлорида натрия, составляло 800 ± 20 мг/дм³.

Исходные, подвергаемые электролизу, 1 % водные растворы ацетата, цитрата, лактата и хлорида натрия по показателю активности водородных ионов (pH) при температуре 23 ± 1 °C, близки к нейтральным значениям (7,1–8,6) с незначительным смещением в щелочную среду (см. табл.).

Показатели pH и ОВП полученных ЭХА-растворов анолитов и католитов приведены в таблице.

Результаты оценки антимикробных свойств ЭХА-растворов анолитов натриевых солей карбоновых кислот (уксусной, лимонной, молочной) и хлорида натрия по отношению к тест-культуре *P. aeruginosa* (штаммы ATCC 25668 и 47) при экспозиции 10 мин. и температуре 22 ± 1 °C представлены на рисунке 3.

Наилучший результат, демонстрирующий антимикробные свойства полученных анолитов солей карбоновых кислот, был достигнут при воздействии ЭХА-раствора, произведенного при электролизе 1 % раствора лактата натрия. При экспозиции 10 мин и температуре 22 ± 1 °C и исходном титре 10^8 КОЕ/см³ было отмечено снижение КОЕ *P. aeruginosa* (штамм ATCC 25668) на 6 порядков, *P. aeruginosa* (штамм 47) на 4 порядка. Менее эффективными показали себя ЭХА-растворы ацетата и цитрата натрия, обеспечивающие снижение КОЕ тест-культур на 4,9 и 4,0 порядка для штамма ATCC 25668; 3,9 и 3,4 порядка для штамма 47 соответственно.



Примечание: * – Исходное количество клеток до воздействия ЭХА-растворов

Рисунок 3. Антимикробные свойства ЭХА-растворов

анолитов по отношению к *Pseudomonas aeruginosa*

при экспозиции 10 мин и температуре 22 ± 1 °C



Источник изображения: freepik.com

Анолит, полученный при электролизе 1 % раствора хлорида натрия, кроме низкого кислотного значения $\text{pH} = 2,8 \pm 0,3$, обладал высоким показателем ОВП = $+1106 \pm 14$ мВ и содержанием оксидантов в эквиваленте активного хлора 800 ± 20 мг/дм³, что в совокупности обеспечило этому раствору выраженные antimикробные свойства и дезинфицирующую активность по отношению к тест-культуре *P. aeruginosa*.

Результаты оценки бактерицидных и antimикробных свойств ЭХА-растворов анолитов, полученных при электролизе 1 % монорастворов ацетата, цитрата и лактата натрия, показали их неэффективность в качестве дезинфицирующих средств.

Полученные результаты позволяют предположить, что в результате электрохимической активации ацетата, цитрата и лактата натрия на лабораторной установке «АКВАТРОН» с инертными электродами процесс электролиза протекает преимущественно по реакции Кольбе без альтернативных конкурирующих реакций, при которых возможно образование субстанций, содержащих активные действующие вещества, способные губительно воздействовать на микроорганизмы. В этом контексте необходимо отметить, что несмотря на множество научных публикаций, подтверждающих осуществление электролиза растворов солей карбоновых кислот по механизму Кольбе [26, 30], многократно упоминаются вариативные процессы, при которых в качестве альтернативы может происходить окисление алкильного радикала, вступающего в последовательные реакции с образованием сложных эфиров или спиртов (реакция Моста-Хефера), с возможным дальнейшим окислением до альдегидов или даже карбоновых кислот [31].

Исследования, описанные V. Laito et al., указывают на эффективную возможность электрохимической активации водных растворов солей слабых органических кислот, не содержащих хлора, и использование этих «безопасных и высокоактивных» растворов в качестве antimикробных средств на пищевых производствах [20]. В исследовании осуществляли электроактивацию водных растворов ацетата калия, цитрата калия и лактата кальция для оценки их противомикробного действия в отношении *E. coli* O157:H7 при комнатной температуре. Однако при более детальном анализе постановки экспериментов необходимо отметить сложность конструкции четырехсекционного электроактивационного реактора с принудительно охлаждаемой до $1,0 \pm 0,5$ °C ванной, рутениево-иридиевыми титановыми электродами, двумя катионообменными и одной анионообменной мембранными. Оценка физико-химических и antimикробных свойств получаемых растворов проводилась после 180 мин. электроактивации. В электролизе участвует 3 % раствор хлорида натрия (NaCl), находящийся в трех камерах реактора и подвергающийся подкислению, но при этом, на наш взгляд, в результатах и обсуждении не дана должная оценка влиянию подкисленных растворов хлорида натрия или присутствующих хлоркислородных оксидантов на противомикробную активность получаемых растворов. Вместе с тем результаты анализов на противомикробную активность показали высокий антибактериальный эффект с сокращением тест-микроорганизмов на более чем 6 порядков КОЕ/см³ при экспозиции 5 мин и эффективность электроактивации для придания водным растворам органических солей высокореакционных свойств, повышающих antimикробную активность, в отличие от сопряженных органических кислот.

Исследования бактерицидных свойств ЭХА-растворов анолитов ацетата, цитрата и лактата натрия в виде монорастворов, полученных на лабораторной электролизной установке, по отношению к тест-культуре *P. aeruginosa* не подтверждают дезинфицирующую активность данных растворов, что не исключает комбинирования солей в исходных растворах для улучшения свойств получаемых анолитов. Электролиз смесевых растворов (хлорида натрия с солями карбоновых кислот) может усилить antimикробные свойства за счет генерации таких реакционноспособных частиц, как пероксиды и гипохлориты, с одновременной активацией органических кислот и электрохимически генерированных радикалов.

При этом снижение концентрации хлорида натрия позволит минимизировать образование токсичных побочных продуктов и коррозионную активность получаемых растворов.

ВЫВОДЫ

По результатам сравнительного анализа физико-химических показателей и антимикробной активности ЭХА-растворов, полученных при электролизе солей карбоновых кислот (ацикетата, цитрата, лактата натрия) и раствора хлорида натрия, можно сделать следующие выводы:

- показатели активности водородных ионов (рН) ЭХА-растворов анолитов на основе натриевых солей карбоновых кислот при температуре 23 ± 1 °C имеют нейтральные значения (6,2–6,8) с умеренным смещением в слабокислую среду, что не оказывает влияния на антимикробные свойства, в отличие от электролизных растворов хлорида натрия с выраженно-кислотным значением ($2,8 \pm 0,3$);
- показатель окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), имеющий важнейшее значение для проявления растворами антимикробных свойств, у ЭХА-растворов натриевых солей карбоновых кислот показывает крайне низкие значения ($+118 \pm 4 \dots +244 \pm 9$ мВ) по сравнению с ЭХА-растворами хлорида натрия ($+1106 \pm 14$ мВ), не влияющими на бактерицидность по отношению к тест-штаммам *P. aeruginosa*;
- оказываемое воздействие ЭХА-растворов натриевых солей карбоновых кислот на тестируемые

микроорганизмы, по всей видимости, связано с наличием в растворах карбоксилатных анионов, но для обеспечения дезинфицирующих свойств этого явно недостаточно:

- выраженная дезинфицирующая активность ЭХА-растворов хлорида натрия обусловлена не только кислотным значением рН и высоким показателем ОВП, но и внушительным содержанием оксидантов в эквиваленте активного хлора (800 ± 20 мг/дм³), отсутствующих в ЭХА-растворах натриевых солей карбоновых кислот.

На основании сделанных выводов можно заключить, что использование монорастворов натриевых солей карбоновых кислот при электролизе в рассматриваемых условиях не обеспечит получение ЭХА-растворов анолитов с выраженными дезинфицирующими свойствами, что не исключает возможности получения эффективных антимикробных растворов в результате электролиза смесевых поликомпонентных солевых растворов, в том числе с добавлением хлорида натрия.

Дальнейший поиск альтернативных методов дезинфекции с заменой и / или сокращением использования хлорактивных компонентов в сочетании с применением ЭХА-растворов, получаемых электролизом поликомпонентных исходных растворов на основе солей карбоновых кислот, является перспективным направлением дальнейших исследований и представляет научно-прикладной интерес для предприятий пищевой промышленности. ■

Поступила в редакцию: 13.05.2025
Принята в печать: 19.09.2025

ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF ELECTROCHEMICALLY ACTIVATED SOLUTIONS OF CARBOXYLIC ACID SALTS VS. SODIUM CHLORIDE

Boris V. Manevich, Elena A. Burykina E., Svetlana A. Kishilova

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow

ORIGINAL ARTICLE

Alternative disinfection methods involve no chlorine-containing solutions, which, despite their effectiveness, generate toxic by-products. This research compared the physicochemical and antimicrobial properties of electrolytic sodium chloride with electrochemically activated solutions of carboxylic acid salts (sodium acetate, citrate, lactate). The focus was on safety and sustainability. Using an electrolysis unit with a diaphragm electrochemical module and electrochemically activated 1% salt solutions, the authors studied the redox potential, the hydrogen ion activity index (pH), the oxidant content (active chlorine equivalent), and the *in-vitro* bactericidal efficacy against *Pseudomonas aeruginosa* (strains ATCC 25668, resistant pc 47, 10 min exposure). The sodium lactate provided microbial reduction by 4–6 lg CFU/cm³ while sodium acetate and citrate solutions were less effective (3.9–4.9 and 3.4–4.0 lg CFU/cm³, respectively). In case of sodium chloride, the reduction was as high as 8 lg CFU/cm³, the initial titers being 8.0 and 8.2 lg CFU/cm³. The electrolytic monosolutions of carboxylic acid salts (Kolbe reaction) demonstrated low results in bactericidal agents, pH, and oxidation-reduction potential. Carboxylic acid salts combined with sodium chloride could synergistically enhance the antimicrobial effect while reducing toxic by-products. If optimized, such electrolysis parameters as voltage, current strength, and initial solutions may increase the disinfection efficiency. The results obtained can be used to develop environmentally safe disinfectants for the food industry.

Keywords: food safety, electrochemical activation, carboxylic acid salts, Kolbe electrolysis, *Pseudomonas aeruginosa*, antimicrobial activity, disinfection, toxic by-products

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Smith, A. M. Outbreak of *Listeria monocytogenes* in South Africa, 2017–2018: Laboratory activities and experiences associated with whole-genome sequencing analysis of isolates / A. M. Smith [et al.] // Foodborne pathogens and disease. 2019. Vol. 16(7). P. 524–530. <https://doi.org/10.1089/fpd.2018.2586>
- Груздева, О. А. *Listeria monocytogenes* сегодня / О. А. Груздева [и др.] // Российский медицинский журнал. 2021. Т. 27. №. 5. С. 491–500. <https://doi.org/10.17816/0869-2106-2021-27-5-491-500>; <https://elibrary.ru/uehqxs>
- Галстян, А. Г. Границы молочной науки: эволюционные императивы и детерминанты развития / А. Г. Галстян [и др.]. – М.: ВНИМИ, 2024. – 319 с.
- Маневич, Б. В. Электролизные растворы в санитарной обработке: прошлое и настоящее / Б. В. Маневич, Е. Н. Титов // Молочная промышленность. 2024. №. 1. С. 60–63. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-1-3>; <https://elibrary.ru/dakxwz>
- Bakhir, V. M. Electrochemical activation inventions systems technology / V. M. Bakhir [et al.]. – Moscow: Viva-Star Printing Plant Publ, 2021. – 660 p.
- Li, X. Electrochemical disinfection for human health protection: Disinfection Mechanisms, System Innovations, Applications / X. Li [et al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12(5). 114073. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114073>
- Nemati, V. Advances in Lettuce postharvest processing: implications for microbiological safety and storage quality / V. Nemati // Journal of Agriculture and Food Research. 2025. Vol. 21. 101824. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101824>
- Stefanello, A. Comparison of electrolyzed water and multiple chemical sanitizer action against heat-resistant molds (HRM) / A. Stefanello [et al.] // International journal of food microbiology. 2020. Vol. 335. 108856. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108856>
- Maojin, T. Bacterial Spore Inactivation Technology in Solid Foods: A Review / T. Maojin [et al.] // Journal of Food Protection. 2025. Vol. 88(5). 100479. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100479>
- Ignatov, I. Preparation of electrochemically activated water solutions (catholyte/anolyte) and studying their physical-chemical properties / I. Ignatov [et al.] // Journal of Medicine, Physiology and Biophysics. 2015. Vol. 13. P. 64–78.
- Deza, M. A. Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* on stainless steel and glass surfaces by neutral electrolysed water / M. A. Deza, M. Araujo, M. J. Garrido // Letters in applied microbiology. 2005. Vol. 40(5). P. 341–346. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2005.01679.x>
- Mishima, S. Control of microbial contamination in dental unit waterlines: Effectiveness of neutral electrolytic water / S. Mishima [et al.] // Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine and Pathology. 2025. Vol. 37(3). P. 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.ajoms.2024.11.012>
- Rahman, S. M. Controlling microbial population in livestock and poultry industry using electrolyzed water as an emerging technology for ensuring food safety / S. M. Rahman [et al.] // Food Control. 2023. Vol. 152. 109843. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109843>
- Поспелов, А. В. Коррозия нержавеющих сталей в дезинфицирующих растворах / А. В. Поспелов [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 1 (33). С. 90–93. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-33-1-94-103>; <https://elibrary.ru/kleumv>
- Hernandez-Pimentel, V. M. Effect of neutral electrolyzed water as antimicrobial intervention treatment of chicken meat and on trihalomethanes formation / V. M. Hernandez-Pimentel [et al.] // Journal of Applied Poultry Research. 2020. Vol. 29(3). P. 622–635. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2020.04.001>
- Gomez-Lopez, V. M. Generation of trihalomethanes with chlorine-based sanitizers and impact on microbial, nutritional and sensory quality of baby spinach / V. M. Gomez-Lopez [et al.] // Postharvest Biology and Technology. 2013. Vol. 85. P. 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.05.012>
- Busch, M. Exploring the mechanism of hypochlorous acid decomposition in aqueous solutions / M. Busch, N. Simic, E. Ahlberg // Physical Chemistry Chemical Physics. 2019. №. 35. P. 19342–19348. <https://doi.org/10.1039/C9CP03439K>
- Cabezas-Pizarro, J. Antimicrobial activity of different sodium and potassium salts of carboxylic acid against some common foodborne pathogens and spoilage-associated bacteria / J. Cabezas-Pizarro [et al.] // Revista Argentina de microbiología. 2018. Vol. 50. №. 1. P. 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.011>
- Liato, V. Influence of electro-activated solutions of weak organic acid salts on microbial quality and overall appearance of blueberries during storage / V. Liato, R. Hammami, M. Aider // Food microbiology. 2017. Vol. 64. P. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.12.010>
- Liato, V. Electro-activation of potassium acetate, potassium citrate and calcium lactate: impact on solution acidity, Redox potential, vibrational properties of Raman spectra and antibacterial activity on *E. coli* 0157: H7 at ambient temperature / V. Liato [et al.] // SpringerPlus. 2016. Vol. 5. P. 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3453-1>
- Cayemite, P. E. Study of the impacts of electro-activated solutions of calcium lactate, calcium ascorbate and their equimolar mixture combined with moderate heat treatments on the spores of *Bacillus cereus* ATCC 14579 under model conditions and in fresh salmon / P. E. Cayemite [et al.] // International journal of food microbiology. 2021. Vol. 358. P. 109285. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109285>
- Liato, V. Study of the antibacterial activity of electro-activated solutions of salts of weak organic acids on *Salmonella enterica*, *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes* / V. Liato [et al.] // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2017. Vol. 44. №. 1. P. 23–33. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1859-y>
- Liato, V. Effect of electro-activated solutions of sodium acetate and sodium propionate on geosmin producing *Streptomyces avermitilis* strain / V. Liato, M. Aider // Chemosphere. 2017. Vol. 188. P. 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.011>
- Faraday, M. Siebente reihe von experimental-Untersuchungen über Elektricität / M. Faraday // Annalen der Physik. 1834. Vol. 109. №. 31–34. P. 481–520. <https://doi.org/10.1002/andp.18341093102>
- Kolbe, H. Ueber die Zersetzung der Valeriansäure durch den galvanischen Strom / H. Kolbe // Journal für Praktische Chemie. 1847. Vol. 42. №. 1. P. 311–313. <https://doi.org/10.1002/prac.18470420140>
- Liu, S. Understanding the reaction mechanism of Kolbe electrolysis on Pt anodes / S. Liu [et al.] // Chem Catalysis. 2022. T. 2. №. 5. P. 1100–1113. <https://doi.org/10.1016/j.checat.2022.02.011>
- Mira, N. P. On the potential role of naturally occurring carboxylic organic acids as anti-infective agents: opportunities and challenges / N. P. Mira, M. Henriques, F. Gomes [et al.] // International Journal of Infectious Diseases. 2024. Vol. 140. P. 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2024.01.011>
- Liao, L. B. The generation and inactivation mechanism of oxidation-reduction potential of electrolyzed oxidizing water / L. B. Liao, W. M. Chen, X. M. Xiao // Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 78. №. 4. P. 1326–1332. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.004>
- Маневич, Б. В. Возможности использования кислотных анолитов в процессах санитарной обработки / Б. В. Маневич, Е. Н. Титов // Молочная промышленность. 2024. № 3. С. 87–94. DOI: <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-3-1>
- Weckhuysen, B. M. Mechanistic insights in electro-synthesis of biomass-derived chemicals: The Kolbe reaction / B. M. Weckhuysen // Chem Catalysis. 2022. Vol. 2. №. 5. P. 920–922. <https://doi.org/10.1016/j.checat.2022.04.017>
- Baumgarten, N. Scalable Microreactor Concept for the Continuous Kolbe Electrolysis of Carboxylic Acids Using Aqueous Electrolyte / N. Baumgarten [et al.] // ChemistryOpen. 2022. Vol. 11. №. 10. P. e202200171. <https://doi.org/10.1002/open.202200171>