ВЛИЯНИЕ PH НА БАКТЕРИЦИДНУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИОКСИДА ХЛОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕСТ-КУЛЬТУРЫ *ESCHERICHIA COLI**

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Галина Михайловна Свириденко, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, руководитель направления микробиологических исследований
E-mail: g.sviridenko@fncps.ru
Татьяна Валентиновна Комарова, младший научный сотрудник
E-mail: t.komarova@fncps.ru
Марина Борисовна Захарова, канд. техн. наук, научный сотрудник, руководитель направления исследований по средствам микробиологического контроля
E-mail: m.zakharova@fncps.ru
Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова, г. Углич

Диоксид хлора (ClO_2) в настоящее время признан одним из наиболее эффективных дезинфектантов в отношении бактерий, в том числе их споровых форм, вирусов, грибов и простейших. Роль pH среды в бактерицидной эффективности диоксида хлора вызывает значительные разногласия среди исследователей. В работе представлены данные по влиянию pH в диапазоне активной кислотности от 3 до 11 на бактерицидную эффективность диоксида хлора относительно тест-культуры *Escherichia coli*, как основного санитарно-показательного микроорганизма для молочного производства. Проведены исследования влияния различной бактериальной обсемененности растворов на бактерицидную эффективность ClO_2. Установлен уровень содержания жизнеспособных клеток в растворах 10^5 КОЕ/см^3. Показано комплексное влияние активной кислотности среды и концентрации диоксида хлора на бактерицидную эффективность относительно тест-культуры *Escherichia coli*. Эффективность обеззараживания, т. е. обеспечение гибели 99,99 % тест-культуры *Escherichia coli* имеет тенденцию к увеличению с понижением pH растворов. Так, минимально исследованная концентрация диоксида хлора 1,7 мг/дм^3 (0,05 % по препарату) достаточна для уничтожения клеток только в кислой среде с pH 3. Концентрация ClO_2 2,5 мг/дм^3 (0,075 % по препарату) уничтожает кишечную палочку в диапазоне pH от 3 до 5. Для полной инактивации *Escherichia coli* в растворах с pH 8 и ниже требуется концентрация 3,3 мг/дм^3 (0,1 % по препарату) ClO_2. Диоксид хлора в концентрации 6,6 мг/дм^3 (0,2 % по препарату) убивает тест-культуру в диапазоне pH от 3 до 10. Во всем исследованном диапазоне активной кислотности эффективная концентрация дезинфектанта составляет 8,3 мг/дм^3 (0,25 % по препарату).

Ключевые слова: диоксид хлора, дезинфекция, бактерицидная эффективность, эффективность обеззараживания, тест-культура *Escherichia coli*, активная кислотность, концентрация дезинфектанта

Для цитирования: Свириденко, Г. М. Влияние pH на бактерицидную эффективность диоксида хлора относительно тест-культуры *Escherichia coli* / Г. М. Свириденко, Т. В. Комарова, М. Б. Захарова // Молочная промышленность. 2024. № 6. С. 76–81. https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-6-18

ВВЕДЕНИЕ

Диоксид хлора стал известен своими дезинфицирующими свойствами в начале 20 века. В течение прошедшего столетия это химическое соединение, благодаря своему высокому бактерицидному и дезодорирующему эффекту, нашло широкое применение в технологиях водоподготовки, а также во многих отраслях пищевой промышленности, в том числе птицеводстве, овощеводстве, в пивоварении, обработке мяса и рыбы и для обеззараживания воздуха производственных помещений [1, 2].

Диоксид хлора (ClO_2) – газ, хорошо растворимый в воде, который при этом гидролизуется незначительно и остается в растворе в молекулярной форме [3]. Является сильным окислителем, приемником электронов у него служат атомы кислорода. В ходе реакции ClO_2 отдает органическим веществам атомы кислорода, не вступая в реакцию замещения хлора, и по этой причине является менее опасным, чем чистый хлор [4, 5]. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания», диоксид хлора относится к 1 классу опасности с остронаправленным типом действия, вызывая острое раздражение органов дыхания и слизистых оболочек. Однако его негативное воздействие зависит от применяемой концентрации и способа использования. По данным зарубежных авторов, диоксид хлора безопасен как для человека, так и животных при концентрациях от 20 до 30 мг/л [6]. В настоящее время диоксид хлора признан одним из наиболее эффективных дезинфектантов в отношении бактерий, грибков, вирусов и простейших [1, 4, 7].

Роль pH среды в бактерицидной эффективности диоксида хлора вызывает значительные разногласия среди исследователей. Широко распространено мнение, что, в отличие от свободного хлора, эффективность диоксида хлора распространяется на широкий диапазон значений pH [2, 4, 6, 8–10]. Так, по данным Liu C. с соавторами и Wen G. с соавторами, ClO_2

* работа выполнена в рамках государственного задания по теме FGUS – 2024-0007

может инактивировать патогены в диапазоне pH от 4 до 10 ед. pH [11, 12]. По результатам других исследователей, при изучении влияния pH растворов от 4 до 9 на дезинфицирующую эффективность диоксида хлора относительно различных устойчивых к антибиотикам штаммов *Staphylococcus aureus* различий во влиянии pH растворов не было обнаружено [13].

В противовес данным, представленным вышеприведенными авторами, другие исследования говорят о существенном влиянии pH воды на эффективность инактивации бактерий диоксидом хлора. Так, Ofori I. и др. изучали влияние активной кислотности на дезинфекцию диоксидом хлора *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*. Скорость подавления *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa* при повышении pH с 6,5 до 8,5 увеличивалась в 4 и в 7 раз соответственно. Эффективность инактивации *Escherichia coli* была значительно выше в щелочных условиях pH по сравнению с pH 6,5. При применении 1 мг/дм^3 количество *Escherichia coli* снижалось на 1 порядок при pH 6,5, а при pH 8,0 – на 4 порядка при тех же условиях [14, 7].

По данным Петренко Н. Ф. с соавторами, чем больше pH, тем меньшие дозы диоксида хлора требуются для уничтожения всех изученных микроорганизмов. Так, при pH 7,0 и температуре 20 °C дозы диоксида хлора, необходимые для инактивации *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*, составляли 0,1 и 0,04 мг/л соответственно, а при pH 9,5 и температуре 5 °C такие дозы составляли 0,05 и 0,03 мг/л диоксида хлора [15].

С другой стороны, данные, представленные в работе Copes W. E. и др., показывают, что диоксид хлора более эффективен в кислой зоне pH в отношении грибов *Thielaviopsis basicola* и *Fusarium oxysporum*. Для достижения летальной дозы, приводящей к 50 % смертности спор (LD50), требовалась более высокая концентрация ClO_2 при pH 8, чем при pH 5 [16]. По данным Zoffoli J. P. с соавторами, эффективность диоксида хлора в отношении спор *Botrytis cinerea*, *Penicillium expansum* и *Rhizopus stolonifer* значительно уменьшалась с увеличением pH с 7 до 10. За 5 мин воздействия 50 мкг/мл диоксида хлора при pH 7 и 8 наблюдалось 100 % ингибирование конидиального прорастания *Botrytis cinerea*, тогда как в тех же условиях, но при pH 10 было получено 38 % ингибирование. Аналогично, полное ингибирование спорангиоспор *Rhizopus stolonifer* и конидий *Penicillium expansum* было получено при pH 7, при pH 10 наблюдалось ингибирование прорастания на 62,1 и 78,3 %, соответственно [17].

Источник изображения: freepik.com

Из проанализированных литературных источников не получено однозначного ответа о влиянии активной кислотности среды на эффективность бактерицидного действия диоксида хлора на микроорганизмы. Поэтому проведение исследований по данному вопросу представляет научный и практический интерес. В работе приведены результаты исследования бактерицидного действия диоксида хлора относительно тест-культуры *Escherichia coli*, как основного санитарно-показательного микроорганизма для молочного производства, в растворах с диапазоном значений активной кислотности от 3 до 11 ед. pH.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении исследований объектами служили рабочие растворы с различной концентрацией диоксида хлора, полученные на основе дезинфицирующего средства «DIOKSICL» (Свидетельство о государственной регистрации продукции № RU.77.99.88.002.E.001044.04.23 от 13.04.23 и Паспорт безопасности химической продукции РПБ № 28737819.20.82920 от 01.08.2023 г.), с различной активной кислотностью и тест-культура *Escherichia coli* М-17-02 (далее тест-культура *Escherichia coli*).

Основной раствор «DIOKSICL» получали перед выполнением экспериментов путем смешивания двух компонентов – компонента «А», представляющего водный раствор хлорита натрия, и компонента «Б», представляющего водный раствор гидросульфата натрия моногидрата, состоящий из органических или минеральных кислот и активатора, в соотношении 1:9. Получали основной раствор с содержанием действующего вещества диоксида хлора в концентрации не менее 0,33 %. Из основного раствора готовили рабочие растворы с концентрацией по препарату от 0,03 до 0,25 %, что соответствует содержанию диоксида хлора от 1,0 до 8,3 мг/дм^3. Массовую концентрацию диоксида хлора в рабочих растворах определяли расчетным методом. Для исключения постороннего обсеменения рабочие растворы готовили на стерильной водопроводной воде.

Порядок работы соответствовал требованиям ГОСТ Р 58151.4-2018 «Средства дезинфицирующие. Методы определения показателей эффективности», «Инструкции по приготовлению и применению дезинфицирующего средства «DIOKSICL» для дезинфекции на предприятиях молочной промышленности»[1].

Определение бактерицидной эффективности рабочих растворов дезинфицирующего средства оценивали по эффективности обеззараживания в отношении тест-культуры *Escherichia coli.* Для проведения испытаний тест-микроорганизм культивировали на питательном бульоне при температуре (37 ± 1) °С в течение 18–24 ч. Из подготовленной культуры готовили разведения в соответствии с требованиями ГОСТ 32901-2014 «Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа» и вносили в исследуемые варианты для получения концентрации клеток от 10^1 до 10^5 КОЕ/см^3. Испытания по оценке чувствительности тест-микроорганизма к диоксиду хлора проводили в растворах с различной концентрацией дезинфицирующего средства.

Влияние pH на дезинфицирующую активность диоксида хлора исследовали в диапазоне активной кислотности от 3 до 11 ед. pH. Для получения растворов с различным уровнем pH использовали стерильные растворы молочной кислоты и гидроксида натрия. Для оценки бактерицидной эффективности диоксида хлора при проведении дезинфекции в растворах готовили контрольные и опытные растворы. В качестве контрольных растворов использовали стерильную воду с соответствующими концентрациями тест-культуры, в качестве опытных – растворы с определенной концентрацией диоксида хлора и аналогичную концентрацию тест-культуры. Смесь после внесения тест-культуры перемешивали и выдерживали 20 мин, затем в опытных вариантах проводили нейтрализацию дезинфектанта раствором тиосульфата натрия в течение 10 мин. Из контрольных и опытных растворов выполняли посевы в среду КМАФАнМ с последующим культивированием посевов при (37 ± 1) °С 24–48 ч по ГОСТ 32901-2014.

Эффективность обеззараживания, (х, %), рассчитывали по формуле:

$$X = 100 - \frac{Оп}{К} \times 100,$$

где Оп – количество колониеобразующих единиц в опытных вариантах, КОЕ/см^3; К – количество колониеобразующих единиц в контрольных вариантах, КОЕ/см^3.

В соответствии с СанПиН 3.3686-21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней» бактерицидная эффективность средств, предназначенных для обеззараживания поверхностей, должна обеспечивать гибель 99,99 % тест-микроорганизмов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований определяли эффективную концентрацию диоксида хлора для уничтожения тест-культуры *Escherichia coli.* Исследования дезинфицирующей эффективности ClO_2 в растворе прово-

[1]Инструкции по приготовлению и применению дезинфицирующего средства «DIOKSICL» для дезинфекции на предприятиях молочной промышленности / Разработана Всероссийским научно-исследовательским институтом маслоделия и сыроделия – филиал ФГБНУ «Федеральный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН. – Углич, Ярославская область, 2022. – 30 с.

дили при концентрациях бактериальных клеток от 10^1 до 10^5 КОЕ/см^3. В результате исследований была выявлена закономерная тенденция уменьшения эффективности обеззараживания с увеличением количества клеток кишечной палочки. Для 100 % уничтожения культуры при содержании жизнеспособных клеток 10^1–10^2 КОЕ/см^3 достаточно концентрации диоксида хлора 1,3 мг/дм^3 (0,04 % по препарату). Для обеспечения такой же эффективности гибели клеток в количестве 10^3 КОЕ/см^3 требуется 1,7 мг/дм^3 дезинфектанта (0,05 % по препарату); 10^4 КОЕ/см^3 *Escherichia coli* прекращали развиваться в растворах с концентрацией препарата вдвое большей – 3,3 мг/дм^3 (0,1 % по препарату). Полностью эффективной для подавления всего исследованного диапазона количества клеток тест-культуры *Escherichia coli* оказалась концентрация диоксида хлора 8,3 мг/дм^3 (0,25 % по препарату) (рис. 1).

Исходя из многолетнего опыта работы в молочной промышленности, было установлено, что максимальная обсемененность оборудования не превышает 10^3–10^4 КОЕ. Поэтому исследования по влиянию диоксида хлора на тест-культуру *Escherichia coli*, для получения гарантированного эффекта, проводили при исходной концентрации жизнеспособных клеток в растворах 10^5 КОЕ/см^3 в диапазоне значений активной кислотности от 3 до 11 ед. pH.

Результаты исследований бактерицидного действия диоксида хлора на тест-культуру *Escherichia coli* в растворах с различным уровнем pH и различной концентрацией дезинфектанта приведены на рисунке 2. Бактерицидная эффективность ClO_2 обеспечивающая гибель 99,99 % клеток *Escherichia coli*, отмечена на рисунках черной линией.

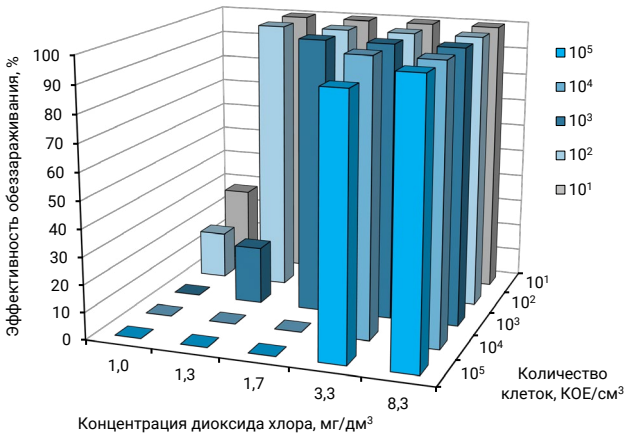

Рисунок 1. Эффективность воздействия различных концентраций диоксида хлора на количество жизнеспособных клеток тест-культуры *Escherichia coli* от 10^1 до 10^5 КОЕ/см^3

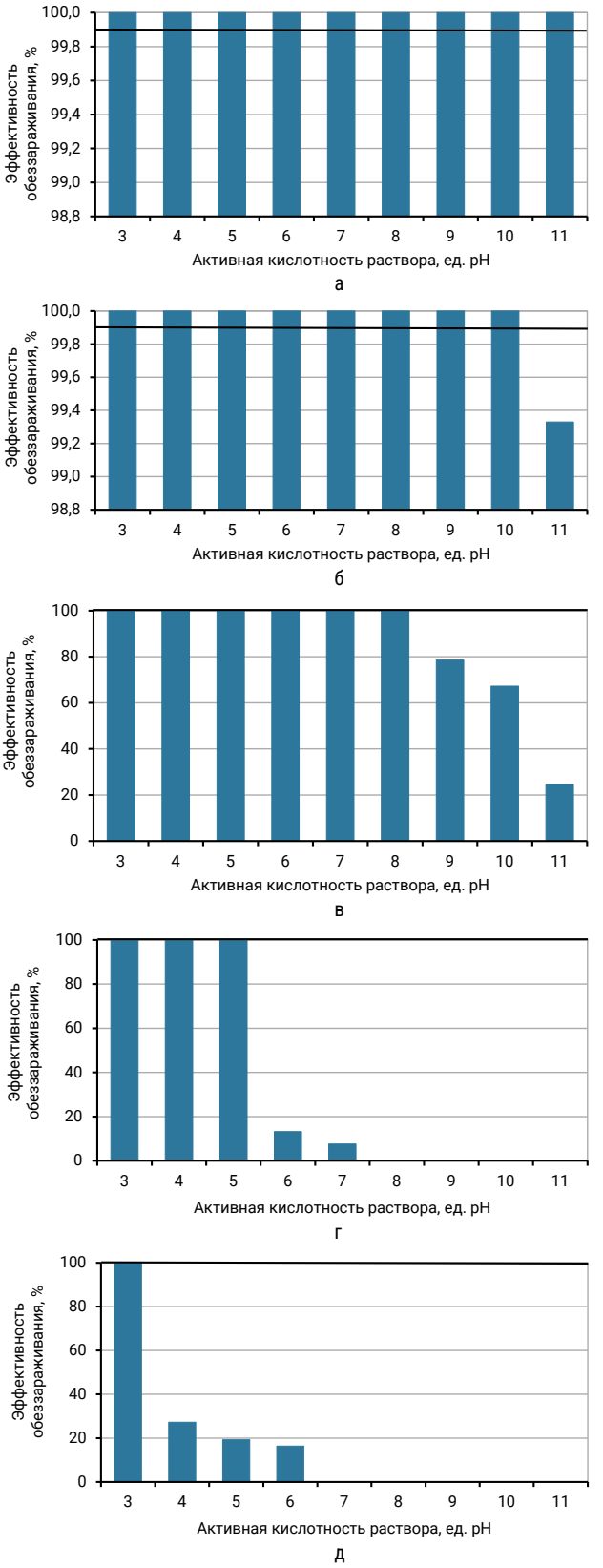

Рисунок 2. Влияние pH растворов на эффективность бактерицидного действия диоксида хлора относительно тест-культуры *Escherichia coli* при концентрации диоксида хлора: а) 8,3 мг/дм^3 (0,25 % по препарату); б) 6,6 мг/дм^3 (0,2 % по препарату); в) 3,3 мг/дм^3 (0,1 % по препарату); г) 2,5 мг/дм^3 (0,075 % по препарату); д) 1,7 мг/дм^3 (0,05 % по препарату)

Результаты исследований, представленные на рисунке 2а, показывают 100 % уничтожение жизнеспособных клеток тест-культуры *Escherichia coli* в растворах, содержащих дозу диоксида хлора 8,3 мг/дм^3 (0,25 % по препарату) при концентрации кишечной палочки 10^5 КОЕ/см^3, независимо от уровня pH в интервале от 3 до 11 ед. pH. При снижении концентрации диоксида хлора в зоне щелочных значений pH, эффективность обеззараживания снижается. В растворе с активной кислотностью 11 диоксид хлора в концентрации 6,6 мг/дм^3 (0,2 % по препарату) эффективен на 99,33 %, т. е. 0,67 % клеток тест-культуры *Escherichia coli* остается жизнеспособной (рис. 2б). Диоксид хлора в дозе 3,3 мг/дм^3 (0,1 % по препарату) полностью эффективен в диапазоне pH от 3 до 8. В более щелочной зоне наблюдается постепенное снижение эффективности обеззараживания (рис. 2в). В растворах с pH 9 летальность тест-культуры составила 78,54 %, с pH 10 – 67,21 %, с pH 11 – 24,56 %. Концентрация дезинфектанта 2,5 мг/дм^3 (0,075 % по препарату) эффективна только в кислой зоне pH от 3 до 5. В растворах с pH 6 происходит резкое снижение ингибирующего эффекта и погибает только 13,21 % клеток (рис. 2г). Меньшая концентрация диоксида хлора 1,7 мг/дм^3 (0,05 % по препарату) перестает оказывать эффективное бактерицидное действие при всех исследованных уровнях pH, кроме растворов с pH 3 (рис. 2д).

Данные, представленные на рисунке 2, свидетельствуют о комплексном влиянии активной кислотности среды и концентрации диоксида хлора на бактерицидную эффективность относительно тест-культуры *Escherichia coli*. Результаты зависимости бактерицидного действия диоксида хлора, обеспечивающего гибель 99,99 % тест-культуры, от концентрации и активной кислотности дезинфицирующих растворов приведены в таблице. Чем ниже концентрация дезинфицирующего средства, тем в более узком диапазоне активной кислотности оно эффективно, при этом бактерицидное действие выше в кислой среде.

Однако, полученные результаты вступают в противоречие с некоторыми исследованиями, которые показывают большую бактерицидную эффективность диоксида хлора относительно *Escherichia coli* в щелочном диапазоне pH [7, 14, 15].

Теоретическое обоснование полученных результатов может быть следующим. При растворении диоксида хлора в воде медленно образуются хлористая и хлорноватая кислоты ($2ClO_2 + H_2O \leftrightarrow HClO_2 + HClO_3$). Реакция диспропорциональная и в кислом диапазоне pH процесс смещается вправо с большим образованием кислот, а в интервале pH 6–9 диоксид хлора остается в водном растворе, как молекулярно растворенный газ, так как равновесие реакции смещается влево [15].

Образующаяся преимущественно в кислом диапазоне pH хлористая кислота очень неустойчива и разлагается с образованием молекулярного хлора ($5HClO_2 \rightarrow 3HClO_3 + Cl_2\uparrow + H_2O$). Молекулярный хлор, как свидетельствуют литературные источники, участвует в проявлении синергетического эффекта с диоксидом хлора и, при низких концентрациях ClO_2, усиливает его бактерицидное действие относительно *Escherichia coli* [18]. Механизм синергии при низких концентрациях диоксида хлора происходит поэтапно. Сначала ClO_2 реагирует с компонентами клеточной стенки *Escherichia coli* и приводит к увеличению ее проницаемости, что облегчает проникновение хлора и остаточного диоксида хлора в цитоплазму, в результате чего разрушаются клеточные структуры и происходит гибель клеток [19].

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено комплексное влияние активной кислотности среды, концентрации диоксида хлора и количества клеток на бактерицидную эффективность относительно грамотрицательных микроорганизмов, типичным представителем которых является *Escherichia coli*. Существует прямая зависимость между уровнем бактериальной обсемененности и эффективной концентрацией ClO_2, необходимой для обеспечения гибели 99,99 % тест-культуры *Escherichia coli*. В кислой среде эффективность диоксида хлора выше, чем в щелочной, и требует

Таблица

Зависимость бактерицидного действия диоксида хлора, обеспечивающего гибель 99,99 % тест-культуры *Escherichia coli*, от концентрации и активной кислотности дезинфицирующих растворов

Концентрация диоксида хлора, мг/дм^3 (% по препарату)	Диапазон активной кислотности, ед. pH
8,3 (0,250)	3–11
6,6 (0,200)	3–10
3,3 (0,100)	3–8
2,5 (0,075)	3–5
1,7 (0,050)	3

меньших концентраций дезинфектанта. Во всем исследованном диапазоне активной кислотности и при исходном количестве жизнеспособных клеток тест-культуры *Escherichia coli* 10^5 КОЕ/см^3 эффективная концентрация дезинфектанта составляет 8,3 мг/дм^3 (0,25 % по препарату). При практическом применении диоксида хлора, в зависимости от pH используемых растворов, можно уменьшать эффективную концентрацию дезинфектанта для полного уничтожения кишечной палочки. ■

EFFECT OF PH ON BACTERICIDAL EFFICACY OF CHLORINE DIOXIDE AGAINST *ESCHERICHIA COLI*

Galina M. Sviridenko, Tatiana V. Komarova, Marina B. Zakharova
All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Production, Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Uglich

ORIGINAL ARTICLE

Chlorine dioxide (ClO_2) is one of the most effective disinfectants against bacteria, spores, viruses, fungi, and protozoa. However, the jury is still out on the role of pH in its bactericidal performance. This research tested the effect of pH 3–11 on the antibacterial properties of chlorine dioxide against *Escherichia coli* as the main sanitary indicator in dairy production. The experiment involved solutions with various levels of bacterial contamination with a viable cell count of 10^5 CFU/cm^3. The pH of the medium and the concentration of chlorine dioxide exerted a complex effect on *E. coli*. The 99.99% disinfection performance occurred at lower pH values. The minimal concentration of chlorine dioxide in this research was 1.7 mg/dm^3 (0.05%). It was efficient against *E. coli* only at pH 3 while 2.5 mg/dm^3 (0.075%) was efficient at pH 3–5. A concentration of 3.3 mg/dm^3 (0.1%) provided complete inactivation of *E. coli* in solutions with pH ≤ 8. Chlorine dioxide at a concentration of 6.6 mg/dm^3 (0.2%) killed the test culture at pH 3–10. The effective concentration across the total pH range was 8.3 mg/dm^3 (0.25%).

Keywords: chlorine dioxide, disinfection, bactericidal efficacy, disinfection efficacy, *Escherichia coli*, pH, disinfectant concentration

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wu, V. C.-H.** Chlorine Dioxide (ClO_2) // Postharvest Management Approaches for Maintaining Quality of Fresh Produce / V. C.-H. Wu. – Cham: Springer, 2016. – P. 209–218. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23582-0_12
2. **Jonnalagadda, S. B.** Chlorine dioxide for bleaching, industrial applications and water treatment / S. B. Jonnalagadda, S. Nadupalli // Indian Chemical Engineer. 2014. Vol. 56(2). P. 123–136. https://doi.org/10.1080/00194506.2014.881032
3. **Gray, N. F.** Chlorine Dioxide // Microbiology of Waterborne Diseases / N. F. Gray. – Academic Press, 2014. – P. 591–598. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-415846-7.00032-9
4. **Петросян, О. П.** Аналитический обзор реагентов, используемых в водоподготовке / О. П. Петросян [и др.] // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. №. 1(5). С. 195–215. https://elibrary.ru/wnifgz
5. **Васильев, А. Л.** Современные методы обеззараживания питьевой воды / А. Л. Васильев, А. С. Тарасов, Л. Д. Гусева // Приволжский научный журнал. 2022. № 3(63). С. 83–89. https://elibrary.ru/exzsjc
6. **Jefri, U. H. N. M.** A systematic review on chlorine dioxide as a disinfectant / U. H. N. M. Jefri [et al.] // Journal of Medicine and Life. 2022. Vol. 15(3). P. 313. https://doi.org/10.25122/jml-2021-0180
7. **Ofori, I.** Chlorine dioxide oxidation of *Escherichia coli* in water – A study of the disinfection kinetics and mechanism / I. Ofori [et al.] // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2017. Vol. 52(7). P. 598–606. https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1293993
8. **Han, J.** Low chlorine impurity might be beneficial in chlorine dioxide disinfection / J. Han [et al.] // Water research. 2021. Vol. 188. 116520. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116520
9. **Фокин, М.** Гигиена должна быть полной! / М. Фокин // Молочная промышленность. 2014. №. 10. С. 28–31. https://elibrary.ru/sujnwh
10. **Al-Otoum, F.** Disinfection by-products of chlorine dioxide (chlorite, chlorate, and trihalomethanes): Occurrence in drinking water in Qatar / F. Al-Otoum [et al.] // Chemosphere. 2016. Vol. 164. P. 649–656. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.008
11. **Liu, C.** Enhanced chlorine dioxide decay in the presence of metal oxides: Relevance to drinking water distribution systems / C. Liu, U. Von Gunten, J. P. Croue // Environmental science & technology. 2013. Vol. 47(15). P. 8365–8372. https://doi.org/10.1021/es4015103
12. **Wen, G.** Inactivation of three genera of dominant fungal spores in groundwater using chlorine dioxide: Effectiveness, influencing factors, and mechanisms / G. Wen [et al.] // Water research. 2017. Vol. 125. P. 132–140. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.038
13. **Wu, M. S.** Inactivation of antibiotic-resistant bacteria by chlorine dioxide in soil and shifts in community composition / M. S. Wu, X. Xu // RSC advances. 2019. Vol. 19. P. 6526–6532. https://doi.org/10.1039/c8ra07997h
14. **Ofori, I.** Chlorine dioxide inactivation of Pseudomonas aeruginosa and Staphylococcus aureus in water: The kinetics and mechanism / I. Ofori [et al.] // Journal of ater process engineering. 2018. Vol. 26. P. 46–54. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.001
15. **Петренко, Н. Ф.** Диоксид хлора: применение в технологиях водоподготовки / Н. Ф. Петренко, А. В. Мокиенко. – Одесса: Optimum, 2005. – 486 с.
16. **Copes, W. E.** Activity of chlorine dioxide in a solution of ions and pH against Thielaviopsis basicola and Fusarium oxysporum / W. E. Copes, G. A. Chastaganer, R. L. Hummel // Plant disease. 2004. Vol. 88(2). P. 188–194. https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.2.188
17. **Zoffoli, J. P.** Effectiveness of chlorine dioxide as influenced by concentration, pH, and exposure time on spore germination of Botrytis cinerea, Penicillium expansum and Rhizopus stolonifer / J. P. Zoffoli [et al.] // Latinoamerican Journal of Agricultural and Environmental Sciences. 2005. Vol. 32(3). P. 127–196. http://doi.org/10.7764/rcia.v32i3.1300
18. **Han, J.** Low chlorine impurity might be beneficial in chlorine dioxide disinfection / J. Han [et al.] // Water research. 2021. Vol. 188. 116520. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116520
19. **Yang, W.** The synergistic effect of Escherichia coli inactivation by sequential disinfection with low level chlorine dioxide followed by free chlorine / W. Yang [et al.] // Journal of water and health. 2012. Vol. 10(4). P. 557–564. https://doi.org/10.2166/wh.2012.067