

ВЛИЯНИЕ pH НА БАКТЕРИЦИДНУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИОКСИДА ХЛОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕСТ-КУЛЬТУР *STAPHYLOCOCCUS AUREUS* И *BACILLUS SUBTILIS**

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Галина Михайловна Свириденко, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, руководитель направления микробиологических исследований

E-mail: g.sviridenko@fnscps.ru

Татьяна Валентиновна Комарова, младший научный сотрудник

E-mail: t.komarova@fnscps.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова, г. Углич

Диоксид хлора применяется в промышленности в качестве дезинфицирующего средства, поскольку обладает антимикробными свойствами в отношении различных видов микроорганизмов, включая грамположительные, грамотрицательные и споровые бактерии, а также вирусы. Данные по влиянию pH на бактерицидную эффективность диоксида хлора относительно стафилококков и споровых микроорганизмов противоречивы. В статье представлены результаты исследований по влиянию pH в диапазоне активной кислотности от 3 до 11 на бактерицидную эффективность диоксида хлора относительно грамположительных микроорганизмов *Staphylococcus aureus* и спорообразующих бактерий *Bacillus subtilis*. Эксперименты проводились при исходной обсемененности тест-культур 10^5 КОЕ/см³. В результате проведенных исследований выявлены различия влияния pH среды на бактерицидные свойства диоксида хлора в зависимости от групповой принадлежности микроорганизмов. Установлено комплексное влияние активной кислотности среды и концентрации ClO_2 на бактерицидную эффективность, как относительно стафилококков, так и спорообразующих бактерий. Для *Staphylococcus aureus* показано, что снижение концентрации ClO_2 сужает эффективный диапазон активной кислотности со смещением в кислую зону pH. Установлено, что минимальная концентрация диоксида хлора, оказывающая бактерицидное действие на стафилококк составляет 0,1 % по препарату при pH раствора от 3 до 5, а концентрация 0,5 % по препарату эффективна во всем исследованном диапазоне pH. Дезинфицирующее действие диоксида хлора в отношении споровых бактерий *Bacillus subtilis* не зависит от pH среды в диапазоне от 3 до 9. В сильнощелочной зоне pH 10 и 11 дезинфектант частично теряет свою активность. В диапазоне pH от 3 до 9 эффективная доза диоксида хлора для *Staphylococcus aureus* должна быть не менее 0,2 % по препарату, а для *Bacillus subtilis* – не менее 0,5 % по препарату.

Ключевые слова: диоксид хлора, бактерицидная эффективность, эффективность обеззараживания, тест-культура, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, активная кислотность, концентрация дезинфектанта

Для цитирования: Свириденко, Г. М. Влияние pH на бактерицидную эффективность диоксида хлора относительно тест-культур *Staphylococcus aureus* и *Bacillus subtilis* / Г. М. Свириденко, Т. В. Комарова // Молочная промышленность. 2025. № 2. с. 57–63. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-2-35>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время диоксид хлора (ClO_2) применяется в промышленности в качестве дезинфицирующего средства благодаря своим антимикробным свойствам, как в жидкой, так и в газообразной форме. ClO_2 способен оказывать бактерицидное действие на различные виды микроорганизмов, включая грамположительные, грамотрицательные и споровые бактерии, а так же оболочечные и безоболочечные вирусы, при этом в настоящее время резистентности у бактерий к диоксиду хлора не выявлено [1, 2].

Диоксид хлора по-разному воздействует на бактерии, грибы, вирусы и простейшие, поскольку они имеют разную клеточную структуру, физиологические особенности развития, метаболизм и устойчивость к факторам внешней среды. ClO_2 убивает бак-

терии, воздействуя непосредственно на клеточную мембрану, разрушая ее структуру и повышая проницаемость, влияет на метаболизм клеток, окисляя белки и липиды, инактивируя ферменты и разрушая ДНК. Для вирусов действие диоксида хлора является летальным, поскольку он разрушает вирусный белковый капсид и фрагменты нуклеиновых кислот [1, 3, 4].

В соответствии с СанПиН 3.3686-21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней» бактерицидная активность растворов дезинфицирующих средств должна обеспечивать гибель 99,99 % тест-бактерий *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus* spp. Поэтому наши исследования по бактерицидной эффективности диоксида хлора были направлены на изучение этих микроорганизмов.

*Работа сделана в рамках госзадания по теме FGUS – 2024-0007.

Сведения о влиянии pH среды на эффективность обеззараживания диоксидом хлора различных групп бактерий в литературных источниках противоречивы. Многие авторы считают, что эффективность диоксида хлора распространяется на широкий диапазон значений pH [5–8]. По данным Kim H. и др., скорость инактивации *Bacillus cereus* увеличивалась при более высоком pH растворов ClO_2 , исследования проводились в диапазоне активной кислотности от 3 до 6 [9]. M. S. Wu и X. Xud исследовали влияние pH на дезинфицирующие свойства диоксида хлора относительно *Staphylococcus aureus*. По их данным эффективность дезинфектанта немного снижается при возрастании pH от 4 до 9 [10]. Ofori I. в своих исследованиях относительно *Staphylococcus aureus* показывает, что скорость инактивации диоксидом хлора стафилококка при pH 8,5 была в 4 раза выше, чем при pH 6,5 [11]. Этот же автор для *Escherichia coli* приводит данные, что бактерицидная эффективность выше при щелочном pH 8 по сравнению с нейтральным и слабокислым pH 7 и 6,5 соответственно [12]. Наши исследования говорят об обратном: эффективность подавления диоксидом хлора кишечной палочки в кислой среде выше, чем в щелочной [13]. Поэтому исследования по влиянию pH среды на эффективность бактерицидного действия диоксида хлора в отношении *Staphylococcus aureus* и *Bacillus subtilis* имеют практическое значение.

Золотистый стафилококк (*Staphylococcus aureus*) – вид сферических грамположительных бактерий из рода стафилококков. Широкое распространение бактерий обусловлено высокой устойчивостью стафилококков к внешним факторам, в том числе температуре, pH и дезинфицирующим средствам. Из дезинфектантов 1 % раствор формалина убивает стафилококки в течение 1 часа, а 1 % раствор хлорамина – через 2–5 мин [14].

Сенная палочка (*Bacillus subtilis*) – вид грамположительных спорообразующих аэробных почвенных бактерий. Споры представляют собой специфическим образом устроенные покоящиеся клетки, выдерживающие экстремальные температуры ниже нуля и выше 100 °C, воздействие сильных кислот, антибиотиков, этанола, четвертичного аммония, агентов на основе перекиси и других неблагоприятных факторов, приводящих к гибели вегетативные клетки [15]. Устойчивость спор определяют несколько факторов, а именно, толстые белковые оболочки, низкое содержание воды в ядре споры, насыщение

ДНК спор группой небольших кислоторастворимых белков (SASP) α/β -типа и т. д. Спорцидным действием обладают некоторые генотоксичные химикаты, сильные кислоты, пероксинитрит и другие вещества, инактивирующие прорастание спор, либо повреждающие внутренние мембраны [16].

По данным Young S. B. и Setlow P., основным фактором устойчивости спор *Bacillus subtilis* к диоксиду хлора, по-видимому, является оболочка споры. Убитые диоксидом хлора споры могут проходить начальные этапы прорастания, но проросшие споры не могут развиваться дальше, вероятно, из-за повреждения мембраны [16].

Целью исследований было выявление влияния pH среды на эффективность бактерицидного действия диоксида хлора относительно грамположительных микроорганизмов *Staphylococcus aureus* и спорового микроорганизма *Bacillus subtilis* в растворах с широким диапазоном значений активной кислотности от 3 до 11, что представляет научный и практический интерес с точки зрения установления эффективных условий обеззараживания производственной среды.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении исследований объектами служили рабочие растворы с различной концентрацией диоксида хлора, полученные на основе дезинфицирующего средства «DIOKSICL» (ООО «Гран При», Россия), с различной активной кислотностью и тест-культуры *Staphylococcus aureus* B-6646 и *Bacillus subtilis* B-3120 (далее тест-культуры *Staphylococcus aureus* и *Bacillus subtilis*).

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 0,075 до 1,0 %. 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 эффективно-
сти рабочих растворов дезинфицирующего средства оценивали по эффективности обеззараживания в отношении тест-культур *Staphylococcus aureus* и *Bacillus subtilis*. Для проведения испытаний *Staphylococcus aureus* культивировали на питательном бульоне, а *Bacillus subtilis* на скошенном питательном агаре при температуре $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 18–24 ч. Из подготовленных культур готовили разведения в соответствии с требованиями ГОСТ 32901-2014 «Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа» для получения концентрации клеток 10^5 КОЕ/см³. Тест-культуру *Bacillus subtilis* использовали без предварительного прогрева, т. е. эксперименты проводились на смешанной культуре, состоящей из вегетативных клеток и спор. Испытания по оценке чувствительности тест-микроорганизмов к диоксиду хлора проводили в растворах с различной концентрацией дезинфицирующего средства при различных значениях pH.

Влияние pH на дезинфицирующую активность диоксида хлора исследовали в диапазоне активной кислотности от 3 до 11. Для получения растворов с различным уровнем pH использовали стерильные растворы молочной кислоты и гидроксида натрия. В качестве контрольных растворов использовали стерильную воду с определенным значением pH и соответствующей концентрацией тест-культур, а в качестве опытных – растворы с определенной концентрацией диоксида хлора при различных значениях pH и аналогичную контрольную концентрацию тест-культур. Опытные и контрольные варианты выдерживали 20 мин, затем в опытных вариантах проводили нейтрализацию дезинфектанта в течение 10 мин, добавляя 1 см³ раствора тиосульфата натрия с концентрацией 50,0 % в 100 см³ опытных растворов. Из контрольных и опытных вариантов выполняли посевы в среду КМАФАнМ с последующим культивированием при $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 48 ч по ГОСТ 32901-2014.

Оценку эффективности обеззараживания ($X, \%$) рассчитывали по формуле:

$$X = 100 - \frac{O_n}{K} \times 100,$$

где O_n – количество колониеобразующих единиц в опытных вариантах, КОЕ/см³;
 K – количество колониеобразующих единиц в контрольных вариантах, КОЕ/см³.

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

Исходя из многолетнего опыта работы в молочной промышленности было установлено, что максимальная обсемененность оборудования не превышает 10^5 КОЕ/см³ в смыве, поэтому исследование по влиянию диоксида хлора на тест-культуры *Staphylococcus aureus* и *Bacillus subtilis* проводили при исходной концентрации жизнеспособных клеток в растворах 10^5 КОЕ/см³ в диапазоне значений активной кислотности от 3 до 11.

Результаты исследований бактерицидного действия диоксида хлора на тест-культуру *Staphylococcus aureus* в растворах с различным уровнем pH и различной концентрацией дезинфектанта приведены на рисунке 1. Бактерицидная эффективность ClO_2 обеспечивающая гибель 99,99 % клеток тест-культуры, отмечена на рисунках черной линией.

Диоксид хлора в концентрации 0,5 % убивает 100 % жизнеспособных клеток *Staphylococcus aureus* во всем исследованном диапазоне pH от 3 до 11 (рис. 1а). Концентрации диоксида хлора 0,25 и 0,2 % эффективны для обеззараживания стафилококка при pH среды от 3 до 9 (рис. 1б и 1в). Увеличение активной кислотности до 10 и 11 для концентрации ClO_2 0,25 % дает снижение количества жизнеспособных клеток тест-культуры на 2 порядка, что соответствует 99,86–99,72 % обеззараживания; а при concentra-

¹Инструкции 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: ВНИИМС, 2022. – 30 с.

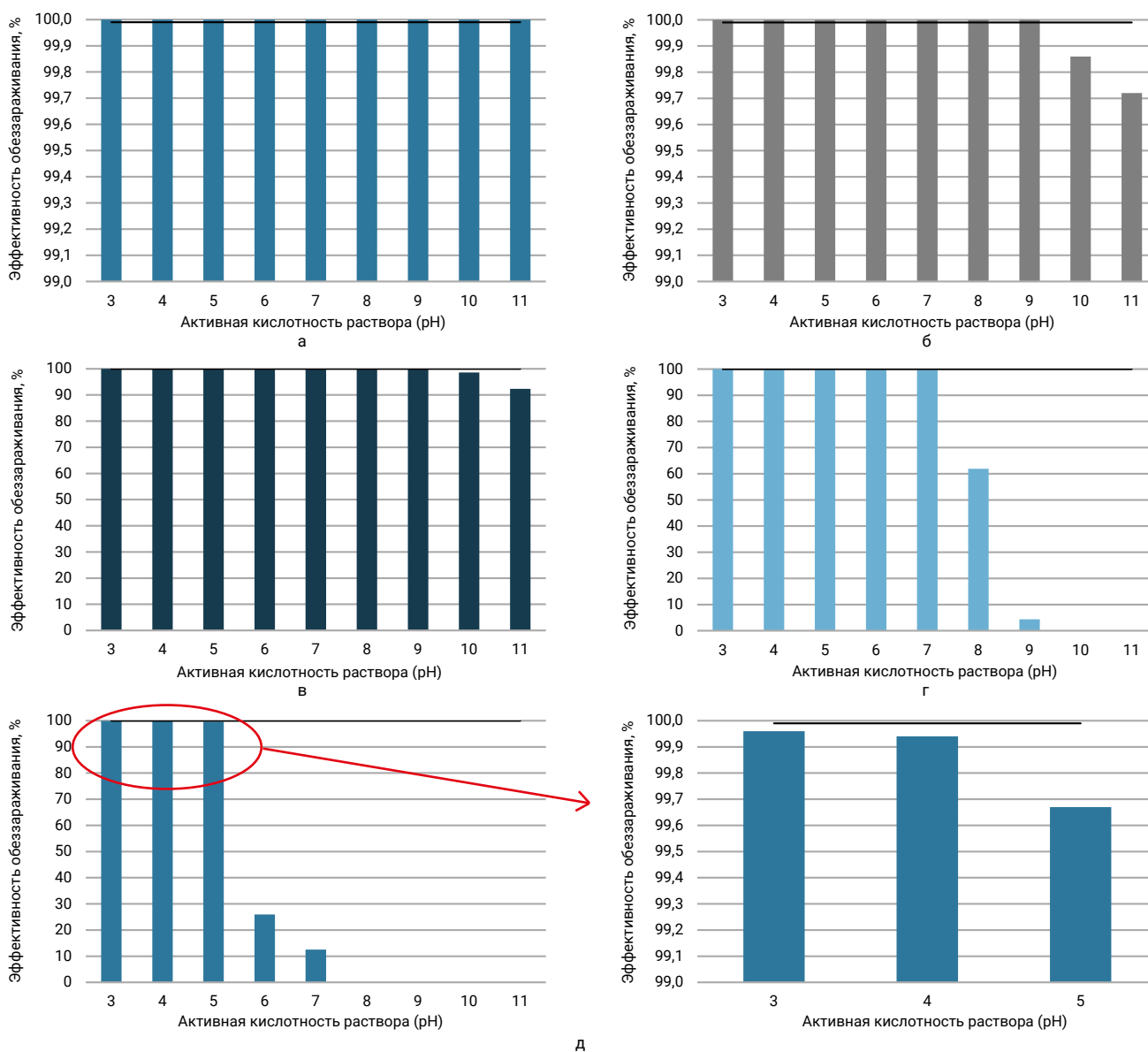


Рисунок 1. Влияние pH растворов на эффективность бактерицидного действия диоксида хлора относительно тест-культуры *Staphylococcus aureus* при концентрации диоксида хлора: а) 0,5 %; б) 0,25 %; в) 0,2 %; г) 0,1 %; д) 0,075 %

ции 0,2 % на 1 порядок – 98,60–92,33 % обеззараживания соответственно. С уменьшением содержания дезинфектанта в растворе до 0,1 % диапазон активной кислотности, в котором диоксид хлора уничтожает 100 % жизнеспособных клеток стафилококка, уменьшается и составляет от 3 до 5 (рис. 1г). При pH 6–7 эффективность обеззараживания снижается на 2–3 порядка до 99,94–99,78 %. В щелочной зоне данная концентрация дезинфектанта не эффективна. При концентрации 0,075 % диоксид хлора не обеспечивает гибели 99,99 % клеток *Staphylococcus aureus* во всем исследованном диапазоне pH, но снижает количество жизнеспособных клеток в кислой среде: на 2–3 порядка, что соответствует 99,96–99,67 % обеззараживания (рис. 1д).

Данные, представленные на рисунке 1, свидетельствуют о комплексном влиянии активной кислотности среды и концентрации диоксида хлора на бактерицидную эффективность относительно тест-культуры *Staphylococcus aureus*. Результаты эффективности обеззараживания *Staphylococcus aureus* в зависимости от концентрации диоксида хлора и активной кислотности среды приведены в таблице 1. Чем ниже концентрация дезинфицирующего средства, тем в более узком диапазоне активной кислотности оно эффективно со смещением в кислую зону pH.

Следующая серия экспериментов посвящена исследованию влияния активной кислотности среды на эффективность диоксида хлора относительно

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

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что концентрации диоксида хлора от 0,5 до 1,0 % по препарату приводят к гибели более 99,99 % клеток *Bacillus subtilis* в диапазоне pH от 3 до 9 (рис. 2а–2в). Концентрация дезинфек-

танта 0,25 % не эффективна при всех исследованных значениях pH, но в диапазоне pH 3–9 бактерицидное действие диоксида хлора находится на одном уровне и составляет 92–94 % обеззараживания (рис. 2г). В сильнощелочной зоне при pH 10 и 11 исследованные концентрации диоксида хлора не обеспечивают гибели 99,99 % клеток споровых микроорганизмов. В диапазоне исследованных концентраций дезинфектанта при данных значениях pH летальность *Bacillus subtilis* колеблется в интервале 99,98–14,71 %. В таблице 2 приведены результаты эффективности обеззараживания тест-культуры *Bacillus subtilis* в зависимости от концентрации диоксида хлора и активной кислотности среды.

Таблица 1. Эффективность обеззараживания тест-культуры *Staphylococcus aureus* в зависимости от концентрации диоксида хлора и активной кислотности среды

Концентрация диоксида хлора, % по препарату	Эффективность обеззараживания, %			
	диапазон активной кислотности, pH 3–5	диапазон активной кислотности, pH 6–7	диапазон активной кислотности, pH 8–9	диапазон активной кислотности, pH 10–11
0,500	100,00	100,00	100,00	100,00
0,250	100,00	100,00	100,00	99,86–99,72
0,200	100,00	100,00	100,00	98,60–92,33
0,100	100,00	99,94–99,78	61,90–4,35	0
0,075	99,96–99,67	25,93–12,50	0	0

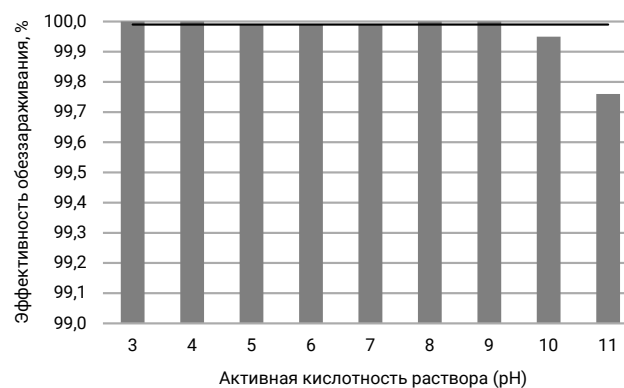
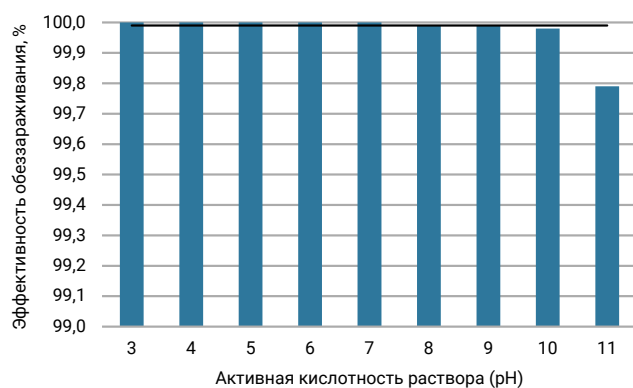


Рисунок 2. Влияние pH растворов на эффективность бактерицидного действия диоксида хлора относительно тест-культуры *Bacillus subtilis* при концентрации диоксида хлора: а) 1,0 %; б) 0,75 %; в) 0,5 %; г) 0,25 %

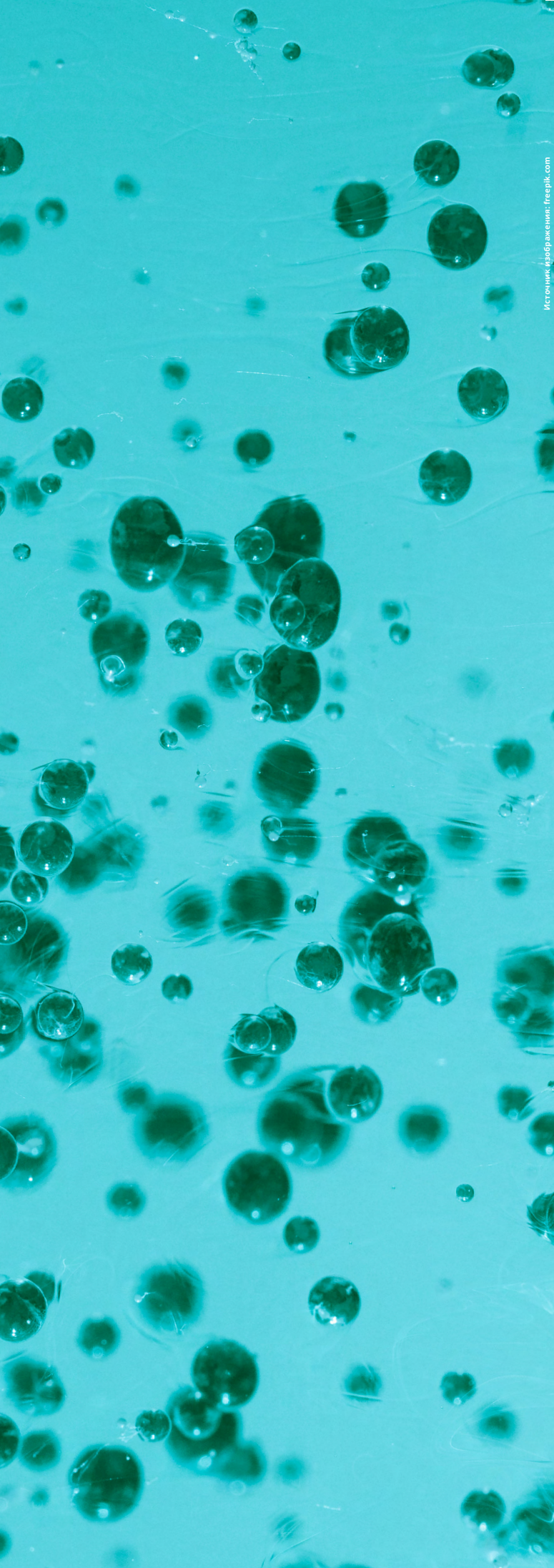


Таблица 2. Эффективность обеззараживания тест-культуры *Bacillus subtilis* в зависимости от концентрации диоксида хлора и активной кислотности среды

Концентрация диоксида хлора, % по препарату	Эффективность обеззараживания, %	
	диапазон активной кислотности, pH 3–9	диапазон активной кислотности, pH 10–11
1,00	99,99–100,00	99,98–99,79
0,75	99,99–100,00	99,95–99,76
0,50	99,99–100,00	99,94–99,32
0,25	92,05–94,71	65,00–14,71

Как видно из приведенных данных, споровые микроорганизмы более устойчивы к действию диоксида хлора, чем стафилококки. Минимально эффективная концентрация, обеспечивающая требуемый уровень обеззараживания, составляет 0,5 % по препарату и не зависит от pH среды в диапазоне от 3 до 9. В сильнощелочной зоне при pH 10 и 11 дезинфектант частично теряет свою активность, в том числе за счет снижения количества диоксида хлора, по причине его нестабильности в щелочных условиях и быстрого разложения на хлорит и хлорат. Ионная хроматография показывает, что ClO_2^- и ClO_3^- являются единственными хлорсодержащими продуктами, образующимися при разложении ClO_2 в щелочном растворе [17, 18]. Процесс разложения диоксида хлора снижает окислительную способность раствора и, как следствие, бактерицидный эффект. В кислой среде процесс разложения ClO_2 идет медленнее, чем в щелочной среде, с образованием хлористой и хлорноватой кислот. При дальнейшем разложении хлористой кислоты образуется Cl_2 , что обеспечивает стабильность бактерицидного эффекта диоксида хлора.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выявлены различия влияния pH среды на бактерицидные свойства диоксида хлора в зависимости от групповой принадлежности микроорганизмов. Установлено комплексное влияние активной кислотности среды и концентрации ClO_2 на бактерицидную эффективность, как относительно грамположительных стафилококков, так и спорообразующих бактерий. В диапазоне pH от 3 до 9 эффективная доза диоксида хлора для *Staphylococcus aureus* должна быть не менее 0,2 % по препарату, а для *Bacillus subtilis* – не менее 0,5 % по препарату. ■

DISINFECTING EFFECT OF CHLORINE DIOXIDE WITH DIFFERENT PH ON *STAPHYLOCOCCUS AUREUS* AND *BACILLUS SUBTILIS*

Galina M. Sviridenko, Tatiana V. Komarova

All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Production, Gorbатов Research Center for Food Systems, Uglich

ORIGINAL ARTICLE

Chlorine dioxide is a popular industrial disinfectant that possesses antimicrobial properties against various viruses and microorganisms, including gram-positive, gram-negative, and spore-forming bacteria. However, the available data become contradictory when it comes to the effect of pH on the bactericidal efficiency of chlorine dioxide against staphylococci and spore-forming microorganisms. The article describes the effect of pH 3–11 on the bactericidal efficiency of chlorine dioxide against gram-positive *Staphylococcus aureus* and spore-forming *Bacillus subtilis*. The initial contamination was 10^5 CFU/cm³. The effect of pH on the bactericidal properties of chlorine dioxide depended on the microorganism. The research revealed the complex effect of pH of the medium and the concentration of chlorine dioxide on the bactericidal efficiency against the gram-positive staphylococci and the spore-forming bacteria. For *Staphylococcus aureus*, a lower concentration of chlorine dioxide limited the effective range of active acidity with a shift to the acidic pH zone. The lowest concentration of chlorine dioxide enough to inhibit the growth of staphylococcus cells was 0.1 % at pH 3–5 while 0.5% proved effective throughout the entire pH range of 3–11. For *Bacillus subtilis*, the disinfecting effect did not depend on the pH of the medium when it remained within pH 3–9 and partially lost its efficiency at pH 10–11. At pH 3–9, the effective dosage of chlorine dioxide was $\geq 0.2\%$ for *Staphylococcus aureus* and $\geq 0.5\%$ for *Bacillus subtilis*.

Keywords: chlorine dioxide, bactericidal efficiency, disinfection efficiency, test culture, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, active acidity, disinfectant concentration

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yee, S. Efficacy of chlorine dioxide as a disinfectant / Yee S. [et al.] // Progress In Microbes & Molecular Biology. 2020. Vol 3(1). <https://doi.org/10.36877/pmbb.a0000128>
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. Jiang, Y. Application of chlorine dioxide and its disinfection mechanism / Y. Jiang [et al.] // Archives of Microbiology. 2024. Vol. 206(10). 400. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04137-7>
4. Andrés, C. M. C. Chlorine dioxide: friend or foe for cell biomolecules? A chemical approach / C. M. C. Andrés [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23 (24). 15660. <https://doi.org/10.3390/ijms232415660>
5. 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>
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). 313. <https://doi.org/10.25122/jml-2021-0180>
7. Han, J. Low chlorine impurity might be beneficial in chlorine dioxide disinfection / J. Han, X. Zhang, W. Li, J. Jiang // Water research. 2021. Vol. 188. 116520. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116520>
8. Al-Otoun, F. Disinfection by-products of chlorine dioxide (chlorite, chlorate, and trihalomethanes): Occurrence in drinking water in Qatar / F. Al-Otoun [et al.] // Chemosphere. 2016. Vol. 164. P. 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.008>
9. Kim, H. Production and stability of chlorine dioxide in organic acid solutions as affected by pH, type of acid, and concentration of sodium chlorite, and its effectiveness in inactivating *Bacillus cereus* spores / H. Kim [et al.] // Food microbiology. 2008. Vol. 25(8). P. 964–969. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.05.008>
10. 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. 9(12). P. 6526–6532. <https://doi.org/10.1039/c8ra07997h>
11. Ofori, I. Chlorine dioxide inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* in water: The kinetics and mechanism / I. Ofori [et al.] // Journal of water process engineering. 2018. Vol. 26. P. 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.001>
12. 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>
13. 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>; <https://elibrary.ru/fljauv>
14. Свириденко, Г. М. Микробиологические риски при производстве молока и молочных продуктов / Г. М. Свириденко. – М.: Издательство Россельхозакадемии, 2009. – 246 с.
15. Malyshev, D. Mode of Action of Disinfection Chemicals on the Bacterial Spore Structure and Their Raman Spectra / D. Malyshev [et al.] // Analytical Chemistry. 2021. Vol. 93(6). P. 3146–3153. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04519>
16. Young, S. B. Mechanisms of killing of *Bacillus subtilis* spores by hypochlorite and chlorine dioxide / S. B. Young, P. Setlow // Journal of Applied Microbiology. 2003. Vol. 9(1). P. 54–67. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01960.x>
17. Marcon, J. New insights into the decomposition mechanism of chlorine dioxide at alkaline pH / J. Marcon [et al.] // Holzforschung. 2017. Vol. 71(7-8). P. 599–610. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0147>
18. Odeh, I. N. New pathways for chlorine dioxide decomposition in basic solution / I. N. Odeh, J. S. Francisco, D. W. Margerum // Inorganic chemistry. 2002. Vol. 41(24). P. 6500–6506. <https://doi.org/10.1021/ic0204676>