

ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ДІОКСИДУ ХЛОРУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ СВІЖИХ ПРОДУКТІВ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Мокієнко А.В., доктор медичних наук, старший науковий співробітник
Національний університет «Острозька академія», м. Острог, Рівненська область

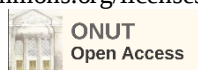
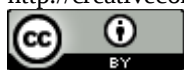
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4491-001X>

E-mail: mokienkoav56@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Анотація. Підтримка мікробної безпеки та якості свіжих фруктів та овочів є глобальною проблемою. Шкідливі мікроби можуть забруднювати свіжі продукти на будь-якому етапі – від ферми до прилавка. Мікробне забруднення може впливати на якість та термін придатності свіжих продуктів, а споживання забруднених продуктів може спричинити харчові захворювання. Крім того, сучасні споживачі приділяють все більшу увагу свіжості та зовнішньому вигляду таких продуктів. Тому потрібні методи дезінфекції, які не тільки зменшують мікробне навантаження, але й зберігають якість свіжих продуктів. Діоксид хлору (ClO_2) став кращою альтернативою дезінфікуючим засобам на основі хлору. Показано, що ClO_2 дестабілізує клітинні мембрани, змінює їх проникність та порушує синтез білка у мікробів, а також впливає на біосинтез етилену та швидкість дихання у свіжих продуктах, що має вирішальне значення для підтримки їх якості. Обґрунтовано ефективність газоподібного та водного ClO_2 у пригніченні росту мікробів одразу після обробки (короткостроковий ефект) порівняно з регулюванням росту мікробів під час зберігання свіжих продуктів (довгостроковий ефект). Детально розглянуто вплив застосування ClO_2 на збереження або покращення якості свіжих продуктів та представлено сучасне розуміння механізму дії ClO_2 проти мікробів, що впливають на якість цих продуктів. Констатовано необхідність проведення випробувань ClO_2 на промисловому рівні для різних видів свіжих продуктів; подальших досліджень хімізму реакцій ClO_2 на оброблених свіжих продуктах; оцінки різних методів отримання ClO_2 та ефективності ClO_2 у поєднанні з іншими технологіями для післязбиральної якості та мікробної безпеки свіжих продуктів.

Ключові слова: діоксид хлору, свіжі продукти, мікробна безпека, якість продукції, зберігання, термін придатності, антимікробний механізм.

Вступ

Свіжі продукти, включаючи фрукти та овочі, є добрим джерелом поживних речовин та важливим компонентом здорового та збалансованого харчування. Однак свіжі продукти схильні до мікробного забруднення, яке може статися на будь-якому етапі ланцюга постачання харчових продуктів, від посіву врожаю до його доставки споживачеві. Крім того, перехресне забруднення може відбуватися під час обробки, упаковки або транспортування свіжих продуктів. Найпоширенішими джерелами забруднення свіжих продуктів є ґрунт, гній тварин та вода для зрошення, а споживання забруднених продуктів може призвести до спалаху харчових отруєнь. У Сполучених Штатах Америки з 2009 по 2018 рік було зареєстровано 340 спалахів харчового отруєння, пов'язаних зі свіжими продуктами [1]. У 2019 році в Європі було зареєстровано 5175 спалахів харчового отруєння, що включали 49 463 випадки, 3859 госпіталізацій та 60 смертельних випадків [2]. Харчові захворювання не лише впливають на здоров'я людини, але й створюють проблеми для туризму, сільського господарства та харчової промисловості, тим самим серйозно впливаючи на соціально-економічний розвиток [3].

Мікробне забруднення може впливати на якість та термін придатності свіжих продуктів. У 2010 році, за оцінками, 31% загальної кількості харчової продукції вартістю 161,6 мільярда доларів було визнано непридатним для споживання людиною на рівні роздрібної торгівлі та споживачів. Зі зростанням усвідомлення важливості споживання свіжих продуктів для здорового способу життя, занепокоєння сучасних споживачів щодо свіжості, зовнішнього вигляду та мікробної безпеки свіжих продуктів зросло.

На рівні роздрібною торгівлі, переважно в супермаркетах та гіпермаркетах, 15–30% свіжих продуктів було відхилено споживачами через стандарти якості, які надмірно наголошують на зовнішньому вигляді. Отже, мікробна безпека та висока якість стали проблемою для харчової промисловості та споживачів.

Для зменшення мікробного навантаження на свіжі продукти було використано кілька фізичних та хімічних методів дезінфекції [4, 5]. Однак потужний метод дезінфекції повинен відповідати наступним критеріям: висока ефективність проти патогенів, здатність зменшувати мікробне псування, потенціал для збереження харчової якості, відсутність утворення неприпустимих рівнів токсичних побічних продуктів або залишків для людини та відсутність впливу на навколишнє середовище [6]. Була досліджена ефективність різних фізичних методів дезінфекції, включаючи високий гідростатичний тиск, холодну плазму, ультрафіолетове випромінювання, ультразвук, імпульсне та іонізуюче випромінювання. Однак ці методи мають різні недоліки. Наприклад, ультразвук демонструє обмежений антимікробний ефект, ультрафіолетове світло має низьке проникнення, а ефект тіні від складних властивостей поверхні продуктів впливає на його ефективність, а імпульсне світло підвищує температуру, що погіршує якість оброблених продуктів [5]. Хлор є найпоширенішим хімічним дезінфікуючим засобом у харчовій промисловості, який ефективний проти широкого спектру патогенів і ефективність якого була оцінена на широкому спектрі свіжих продуктів [7]. Однак хлор може реагувати з природними органічними речовинами та утворювати галогеновані канцерогенні побічні продукти, такі як тригалометани або галооцтові кислоти [7]. Більше того, через проблеми безпеки та ефективності використання хлору для стерилізації свіжозрізаних продуктів було заборонено в таких країнах, як Бельгія, Швейцарія та Нідерланди [5]. Тому було визначено або запропоновано кілька хімічних альтернатив, таких як діоксид хлору (ClO_2), озон, електролізована вода, ефірні олії, вуглекислий газ високого тиску та органічні кислоти [5]. Наприклад, електролізована вода та озон є потужними дезінфікуючими засобами; однак для ефективного зменшення мікробної активності потрібна висока концентрація або тривалий вплив. Надмірне використання цих обробок може негативно вплинути на якість продукції [5]. Органічні кислоти безпечні та прості у використанні, але їхня антимікробна ефективність обмежена. Ефірні олії є природними антимікробними агентами; однак практично важко використовувати ці олії через їх гідрофобну, летку та нестабільну природу [5].

Застосування ClO_2 , окислювального газу, ефективно контролює бактеріальне, грибкове та вірусне забруднення свіжих продуктів [7, 8]. На відміну від хлору, ClO_2 не утворює токсичних побічних продуктів і не змінює поживні та органолептичні якості харчових продуктів, а також ефективний у широкому діапазоні pH (pH 3–8). Крім того, він широко використовується як засіб знезараження води різного виду користування, відбілювач у паперовій промисловості та як дезінфікуючий засіб у лабораторіях, лікарнях, громадських місцях та інших сферах [7]. Завдяки своїй ефективності та безпеці, ClO_2 був схвалений для дезінфекції свіжих продуктів та в харчовій промисловості [9]. Нещодавно Praeger та ін. [7] та Sun та ін. [8] всебічно розглянули антимікробну активність водного та газоподібного ClO_2 відповідно. В огляді [10] представлено дані літератури щодо впливу ClO_2 на початкове зниження росту мікробів (короткостроковий ефект) та кінцеве зниження мікробних популяцій під час зберігання свіжих продуктів (довгостроковий ефект). Обговорюється ефективність застосування ClO_2 для підтримки якості свіжих продуктів та механізм дії ClO_2 проти мікробів, що впливають на свіжі продукти.

Мета

Аналіз даних літератури щодо застосування діоксиду хлору для контролю якості та безпечності свіжих продуктів (овочів та фруктів).

Результати та їх обговорення.

Способи застосування діоксиду хлору

Діоксид хлору - це жовтувато-зелений газ, який добре розчиняється у воді, приблизно в 10 разів більш розчинний у воді, ніж хлор, особливо в холодній воді. Крім того, він залишається в розчині у вигляді розчиненого газу без гідролізу. Отже, його можна використовувати як у водній, так і в газоподібній формах.

Водний розчин ClO_2 можна використовувати для обприскування, занурення або миття свіжих продуктів, оскільки він забезпечує адекватну концентрацію ClO_2 та час контакту, що є визначальними факторами його ефективності проти патогенів. Крім того, водне застосування ClO_2 відносно легко впровадити або прийняти на існуючих мийних лініях у харчовій промисловості без зміни наступних процесів. Однак після обробки водним розчином ClO_2 потрібне промивання водою, що призводить до утворення залишкової вологості на поверхні продуктів, яка може стимулювати ріст мікробів.

На відміну від водного розчину ClO_2 , газоподібний ClO_2 є більш ефективним проти патогенів завдяки своєму вищому потенціалу досягати мікробів незалежно від нерівностей поверхні свіжих продуктів. ClO_2 зазвичай утворюється в результаті реакції кислоти з хлоратом або хлоритом натрію та газоподібним хлором [7]. Оскільки для застосування газоподібного ClO_2 не потрібна вода, можна уникнути ризику

перехресного забруднення з переробленою промивною водою. Однак основним обмеженням застосування газоподібного ClO_2 є його виробництво на місці, оскільки його не можна стискати, зберігати або транспортувати під тиском. Крім того, виробництво ClO_2 є трудомістким і дорогим, і технічно складно підтримувати точну концентрацію ClO_2 під час газової обробки.

В якості альтернативи було розроблено кілька систем пакування, які можуть генерувати та вивільняти ClO_2 . У цих системах матеріали, що генерують газоподібний ClO_2 , наприклад перфоровані саше, пакетики, таблетки, плівки та подушечки, включаються до системи пакування за допомогою різних методів [11]. Крім того, для розробки активного пакувального матеріалу враховуються такі фактори, як швидкість вивільнення активного матеріалу, його ефективність проти мікробів та підтримка терміну придатності продукту, що упаковується. Ці системи пакування часто призначені для використання в поєднанні з іншими технологіями, такими як пакування в модифікованій атмосфері (MAP).

Способи дії діоксиду хлору

Антимікробні механізми

Антимікробний механізм ClO_2 включає дестабілізацію клітинної мембрани, зміну її проникності та переривання синтезу білка. ClO_2 реагує з окисненованими сполуками та білками в клітинних мембранах, що призводить до порушення клітинного метаболізму [7]. Пошкодження мембран у спорах *Bacillus subtilis*, що піддалися впливу ClO_2 , пригнічує їх розвиток після проростання. Більше того, ClO_2 окислює відкриті сульфгідрильні групи білків клітинної поверхні, тим самим пошкоджуючи мембрану та збільшуючи проникність зовнішньої мембрани. Втрата контролю проникності, що видно з витоку іонів K^+ , призводить до руйнування трансмембранного іонного градієнта в *Escherichia coli*. Крім того, втрата клітинної активності або загибель клітин у *Pseudomonas aeruginosa* та *Staphylococcus aureus*, оброблених ClO_2 , корелює зі збільшенням проникності внутрішньої та зовнішньої клітинних мембран та подальшим вивільненням життєво важливих ядерних матеріалів [12]. При вищих концентраціях ClO_2 індукує накопичення малонового діальдегіду (MDA), що вказує на виникнення перекисного окислення мембран [13]. Однак попередні дослідження, засновані на просвічувальній електронній мікроскопії, не виявили значних морфологічних пошкоджень або лізису клітин [12, 13]. Крім того, амінокислоти, включаючи цистеїн, тирозин, триптофан, гістидин та пролін, реагують із ClO_2 , з порядком їхньої реакційної здатності від високого до низького відповідно.

Віруліцидний механізм ClO_2 варіюється залежно від складу та тривимірної структури вірусних білків та нуклеїнових кислот. Деградація вірусних капсидних білків пригнічує прикріплення бактеріофагів, що піддаються впливу ClO_2 , до клітин хазяїна [14]. Аналогічно, руйнування глікопротеїнів, опосередковане ClO_2 , впливає на прикріплення вірусу до клітинних рецепторів та змінює життєвий цикл вірусу репродуктивно-респіраторного синдрому свиней [15]. Крім того, повідомлялося, що денатурація вірусних білків бере участь в інактивації ротавірусу людини. ClO_2 пошкоджує 5'-некодуєчу ділянку вірусного геному, необхідну для утворення нових вірусних частинок у клітинах хазяїна.

Фунгіцидний механізм ClO_2 включає порушення як плазматичної, так і мітохондріальної мембран [16]. Обробка ClO_2 викликає витік іонів, пригнічення активності ключових ферментів у метаболічних шляхах та зміну структури клітин у *Saccharomyces cerevisiae*. Крім того, ClO_2 індукує перекисне окислення ліпідів мембран, що проявляється підвищенням рівнем MDA у *Penicillium expansum*.

Потенційні механізми регулювання якості свіжих продуктів

Механізми, що лежать в основі регуляції якості свіжих продуктів за допомогою ClO_2 , включають його вплив на частоту дихання та біосинтез етилену. Пригнічення біосинтезу етилену за допомогою ClO_2 , спричинене пригніченням генів, пов'язаних з біосинтезом етилену, включаючи ACS2, ACO1 та ACO3, впливає на фізіологічні та біохімічні зміни, що відбуваються під час дозрівання та старіння плодів. Зниження частоти дихання та транспірації затримує споживання поживних речовин та води, що безпосередньо впливає на твердість плодів, втрату маси та розм'якшення. Якість свіжих продуктів під час зберігання залежить від кореляції між клітинною енергією та окисно-відновним статусом. Наприклад, затримка старіння плодів лонгану, обробленого ClO_2 , пов'язана зі змінним окисно-відновним станом та збільшенням клітинної енергії. Крім того, зниження мікробної захворюваності на продукти, оброблені ClO_2 , призводить до збереження якості та продовження терміну придатності.

Вплив обробки діоксидом хлору на мікроби, що впливають на свіжі продукти

Концентрація діоксиду хлору та час контакту мають вирішальне значення для визначення ефективності ClO_2 , яка також може змінюватися залежно від типу мікроорганізму та свіжих продуктів. Короткострокова та довгострокова ефективність ClO_2 у пригніченні росту вже існуючих або штучно інокульованих мікроорганізмів була продемонстрована на широкому спектрі свіжих продуктів. Крім того, деякі звіти свідчать про те, що штучно інокульовані патогени людини, такі як *E. coli*, *Salmonella spp.* та *Listeria monocytogenes*, демонструють вищу інактивацію на свіжих продуктах, ніж природна мікрофлора після застосування ClO_2 [7].

Короткострокові ефекти

Овочі

Миття листових овочів водним розчином ClO_2 було ефективним для інактивації природної мікрофлори. Наприклад, початкові популяції аеробних мезофільних, аеробних психротрофних та молочнокислих бактерій, дріжджів та цвілі у скибочках сирого спаржевого салату зменшилися на 1–3 log після обробки 100 мг/л ClO_2 протягом 20 хвилин. Крім того, вплив 3 мг/л ClO_2 протягом 1 хвилини зменшував епіфітну мікробіоту на свіжозрізаному салаті айсберг на 1–2 log. Ефективність ClO_2 проти штучно інокульованих патогенів, таких як *E. coli*, *Salmonella spp.* та *L. monocytogenes*, була широко досліджена на салаті. 2-хвилинна обробка 100 або 200 мг/л водного розчину ClO_2 в салаті айсберг призвела до зниження контамінації *E. coli* O157:H7 >1 log. Подібні результати були отримані для *S. typhimurium* та *L. monocytogenes*, інокульованих на салаті айсберг з нижчими концентраціями ClO_2 , але тривалішим впливом (10 хв). Більше того, встановлено зниження контамінації *E. coli* O157:H7 та *L. monocytogenes* на >5 log після застосування ClO_2 (5 мг/л протягом 5 хв) на зеленолистовому салаті. Подібні спостереження були зроблені на цілих головках салату айсберг, що піддавалися впливу 5 мг/л газоподібного ClO_2 протягом 15–20 хв. У листі шпинату обробка високою концентрацією ClO_2 протягом короткого часу контакту (100 мг/л протягом 5 хв) або низькою концентрацією ClO_2 з тривалим часом впливу (10 мг/л протягом 20 хв) призвела до приблизно аналогічних рівнів зниження кількості патогенів.

У кількох дослідженнях вивчали дезінфекцію томатів за допомогою ClO_2 [7, 8]. Для штучно інокульованих людських патогенів спостерігалось зниження мікробної контамінації на 5–7 логарифмів при концентрації газоподібного ClO_2 < 1 мг/л. Наприклад, 12-хвилинна експозиція до 0,5 мг/л ClO_2 призвела до зниження контамінації *Salmonella* та *L. monocytogenes* на >5 логарифмів у вирощених гідропонно помідорах. Зі збільшенням часу експозиції (приблизно 1 год) виноградні помідори продемонстрували зниження забруднення *Salmonella spp.* на >7 логарифмів при 25°C. Показана ефективність короточасного впливу високих концентрацій ClO_2 в інактивації *S. enterica*, інокульованої на помідорах: початкові популяції (6 log) зменшилися до 3 log, 2 log та 1 log у відповідь на 8 мг/л ClO_2 протягом 60 с, 10 мг/л ClO_2 протягом 120 с та 10 мг/л протягом 180 с відповідно. Попередні дослідження показують, що ефективність дезінфекції ClO_2 на помідорах, свіжоінокульованих *Salmonella* та *Erwinia carotovora*, вища, ніж на продуктах з висушеним інокулятом. Більше того, упаковка томатів матеріалами, що генерують ClO_2 , такими як плівки, саше та пакетики, ефективно знижує кількість мікробів з 4 до 6 log до невизначеного рівня [17]. Повідомлено про повне пригнічення росту міцелію *Alternaria alternata* та *Stemphylium vesicarium* за допомогою 3-хвилинної обробки ClO_2 . Також повідомлялося, що ефективність ClO_2 зростає зі збільшенням відносної вологості та температури [18].

Антимікробну ефективність ClO_2 також оцінювали на інших свіжих овочах. Після обробки ClO_2 мінімально оброблена морква демонструвала значне зниження рівня мезофільних аеробних бактерій (1,9 log), психротрофів (1,7 log), молочнокислих бактерій (2,6 log) та дріжджів (0,7 log). Картопля, що піддавалася впливу ClO_2 протягом 5 годин, продемонструвала зниження природної мікрофлори та *Pseudomonas aeruginosa* на 5 log та 6 log відповідно. Застосування ClO_2 протягом 30 хвилин зменшило навантаження *E. coli* O157:H7 або *L. monocytogenes*, інокульованих на пошкодженій поверхні зеленого перцю, на 6,5 та 3,5 log відповідно. Аналогічно, обробка ClO_2 ефективно інактивувала природну мікробіоту та сальмонелу на поверхні перцю чилі [19]. Крім того, дезінфекція червоного перцю чилі за допомогою ClO_2 після сушіння гарячим повітрям значно зменшила популяції спор *Bacillus cereus* нижче 1,7 log.

Фрукти

Обробка водним розчином ClO_2 (80 мг/л) протягом 15 хвилин призвела до зниження аеробних бактерій у шовковиці приблизно на 1,5–3 log. Аналогічно, 10-хвилинна обробка 100 мг/л ClO_2 значно зменшила початкові популяції природної мікрофлори в чорниці. При застосуванні газоподібного ClO_2 (5,5 мг/л) спостерігалось зниження навантаження штучно інокульованих *Salmonella spp.* на >5 log у цілих ягодах чорниці та полуниці [20]. Подібні результати спостерігалися для *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7, дріжджів та плісняви. Однак ефективність ClO_2 була вищою для *Salmonella*, інокульованої на тканинах шкірки чорниці, ніж для тих, що були інокульовані на тканинах рубця стебла. Повідомлено про зниження навантаження *Colletotrichum acutatum* на чорницю приблизно на 4 log за допомогою фумігації ClO_2 . Ягоди, оброблені ClO_2 , що генерувався в невеликій камері з підкисленим розчином хлориту натрію, зменшили популяції вірусу Tulane на >1–3,3 log [21, 22].

У попередніх дослідженнях вивчався вплив різних концентрацій та часу експозиції ClO_2 на популяції *E. coli* O157:H7 та *L. monocytogenes* на поверхні шкірки, плодоніжці та порожнинах чашечки яблук. Експозиція 4,0 мг/л ClO_2 протягом 10 хвилин призвела до зменшення популяцій *L. monocytogenes* на 5,5 log. Обробка 12,0 мг/л ClO_2 протягом 10 хвилин, 7,2 мг/л ClO_2 протягом 20 хвилин або 4,8 мг/л ClO_2 протягом 30 хвилин повністю пригнічувала популяцію бактерій, яка спочатку була інокульована на шкірці. Більше того, після 3 годин експозиції пакетиків з низьким вивільненням ClO_2 , популяція спор

Allicyclobacillus acidoterrestris зменшилася до 4,5 log на поверхні яблук. 10-хвилинна фумігація апельсинів розчином ClO_2 концентрацією 0,5 мг/л призвела до зниження навантаження сальмонели більш ніж на 5 log. Газоподібний ClO_2 у концентраціях 200–1800 мг/л значно знизив частоту утворення зеленої плісняви на цитрусових, включаючи мандарини та перуанські апельсини, а також *Penicillium digitatum* на грейпфрутах [23]. Крім того, обробка ClO_2 ефективно зменшила забруднення *Xanthomonas citri* як штучно, так і природним чином забруднених цитрусових [24]. Згідно з повідомленнями, обробка ClO_2 є більш ефективною проти *E. coli*, інокульованої на гладких поверхнях без рубців від стебла, ніж на шорстких ділянках з рубцями від стебла. Крім того, для повної інактивації *X. citri* на поверхні грейпфрута потрібна вища концентрація ClO_2 , ніж для *E. coli*.

Довгострокові наслідки

Післязбиральне зберігання є важливим для деяких видів свіжих продуктів; однак, мікробні популяції поступово збільшуються під час їх зберігання. Отже, для забезпечення тривалого захисту оброблених продуктів потрібен надійний метод дезінфекції. Початкове зниження мікробного навантаження є важливим для продовження терміну зберігання свіжих продуктів [16]. Попередні дослідження повідомляли про різну ефективність ClO_2 у пригніченні росту мікробів під час післязбирального зберігання продуктів [7, 11]. 20-хвилинний вплив водного розчину ClO_2 пригнічував ріст природної мікрофлори та продовжував термін зберігання спаржевого салату на 10 днів. У свіжих продуктах, оброблених ClO_2 , включаючи яблука, зелений листовий салат, диню канталупу та полуницю, популяції інокульованих патогенів залишалися відносно незмінними, тоді як ріст природної мікрофлори значно уповільнився після 9 днів зберігання при 4°C. У салаті обробка ClO_2 (5,0 мг/л протягом 10 хв) підтримувала популяції мезофільних та психротрофних бактерій, дріжджів та цвілі в межах виявленої межі протягом 5 днів при 4°C. Аналогічно, помідори, оброблені ClO_2 , демонстрували значно низьку чисельність мікрофлори протягом 28 днів зберігання; однак ефективність ClO_2 змінювалася залежно від часу експозиції та концентрації ClO_2 . Обробка поверхні помідорів газоподібним ClO_2 з концентрацією 0,5 мг/л протягом 12 хвилин затримувала ріст природної мікрофлори та подовжувала термін їх зберігання на 7 днів при температурі 22°C. Крім того, обробка ClO_2 значно затримувала розвиток білої плісняви та чорних плям на ранах помідорів сорту «Рома», інокульованих *S. vesicarium* та *A. alternata*. Контрольоване вивільнення ClO_2 (4–6 мг/л) зменшило навантаження *E. coli*, *Salmonella* та *A. alternata* помідорів на 3–5 log до кінця 14-денного періоду зберігання. Крім того, полуниця, упакована з подушками, що генерують ClO_2 , демонструвала знижений ріст дріжджів та плісняви до 8 днів їх 12-денного періоду зберігання при 2°C [25]. Аналогічно, обробка ClO_2 знизилу загальну кількість аеробних бактерій, дріжджів та цвілі на 0,95 та 0,94 log відповідно у винограді після 6 тижнів зберігання при температурі 10°C.

Натомість, ClO_2 не виявляє довгострокового впливу на зменшення мікробного забруднення, незважаючи на свій початковий ефект. Обробка огірків різними концентраціями ClO_2 , від 20 до 125 мг/л, не затримувала ріст цвілі під час зберігання [7]. Хоча обробка ClO_2 у поєднанні з MAP була ефективною у контролі мікрофлори під час зберігання, обробка ClO_2 сама по собі не могла зменшити кількість *S. typhimurium* та *L. monocytogenes*. Обробка ClO_2 свіжозрілого салату, упакованого в MAP, не пригнічувала ріст дріжджів під час зберігання. Однак, 3 та 5 мг/л ClO_2 були ефективнішими проти *L. monocytogenes*, ніж дріжджів та плісняви під час холодного зберігання.

Вплив обробки діоксидом хлору на якість свіжої продукції після збору врожаю

Колір

Колір є однією з важливих характеристик, що визначає візуальну якість та прийнятність свіжих продуктів. Залежно від концентрації, ClO_2 по-різному впливає на зовнішній вигляд оброблених свіжих продуктів. Однак попередні дослідження показують, що ClO_2 не впливає на колір свіжих продуктів, зокрема помідорів, шпинату та салату. Аналогічно, обробка газоподібним ClO_2 з концентрацією 0,5 мг/л протягом 12 хвилин суттєво не вплинула на колір апельсинової шкірки. Крім того, зовнішній вигляд чорниці не зазнав змін від тривалого впливу ClO_2 (2–12 год). Натомість, вищі концентрації ClO_2 призводять до знебарвлення свіжих продуктів. Наприклад, полуниця, оброблена ClO_2 , зазнала відбілювання після 8 днів зберігання при температурі 2°C [25]. Окислення олігосахаридів, таких як целюлоза та геміцелюлоза, а також хлорофілу, було висунуто як можлива причина відбілювання свіжих продуктів.

Повідомлялося, що діоксид хлору по-різному впливає на ферментативне потемніння свіжих продуктів, що є результатом окислення фенолів до о-хінонів, яке каталізується поліфенолоксидазою (РРО) під час післязбиральної обробки та переробки. У винограді багаторазове застосування ClO_2 під час зберігання значно зменшило потемніння стержня [26]. Зменшення потемніння різноманітних свіжих продуктів, таких як свіжозрізаний салат зі спаржею та яблука, пов'язане зі зниженням активності РРО. Це можна пояснити окисленням дисульфідних зв'язків та амінокислот в активному центрі РРО за допомогою ClO_2 . Навпаки, обробка ClO_2 також може спричинити потемніння свіжих продуктів. Наприклад, обробка ClO_2 призвела

до швидкої зміни кольору листя шпинату, потемніння грейпфрута, капусти, салату, персиків та яблук.

Твердість

Твердість, ще одна важлива характеристика, що визначає якість, впливає на привабливість для споживачів та комерційну цінність свіжих продуктів. Обробка ClO_2 зберігає твердість кількох свіжих фруктів, таких як полуниця, сливи, абрикоси та манго, під час післязбирального зберігання [27]. Крім того, повідомлялося, що контрольоване вивільнення газоподібного ClO_2 регулює твердість неінокульованих та інокульованих *E. coli* та *C. acutatum* ягід під час зберігання.

Після збору врожаю у свіжих продуктах продовжуються дихання та транспірація, а запаси вуглеводів та води постійно витрачаються без поповнення, що призводить до прогресуючої втрати тургору та ваги під час зберігання. Вологість та втрата ваги плодів пов'язані зі зниженням твердості плодів та їх зморщуванням [28]. Однак ClO_2 знижує швидкість втрати води в оброблених продуктах. Було показано, що застосування ClO_2 у низьких концентраціях протягом тривалого часу в активному пакувальному матеріалі покращує твердість плодів та зменшує втрату води.

Менша втрата ваги ягід, оброблених ClO_2 , пов'язана з 50% закритими порами під час зберігання за низьких температур. Загалом, дозрівання плодів пов'язане зі збільшенням виробництва етилену та значними модифікаціями полісахаридів клітинної стінки. ClO_2 уповільнює збільшення швидкості дихання та біосинтезу етилену. Це призводить до затримки дозрівання, що, своєю чергою, спричиняє затримку розм'якшення плодів. ClO_2 також може змінювати тканинний метаболізм, окислюючи клітинні компоненти, що призводить до змін у диханні та, в свою чергу, пригнічує втрату ваги та підтримує твердість плодів.

Сенсорні властивості

Попередні дослідження показали, що обробка ClO_2 може зберегти сенсорні властивості свіжих продуктів. Наприклад, обробка газоподібним ClO_2 (4,1 мг/л) не погіршила сенсорні якості чорниці, полуниці та малини, що зберігалися протягом 10 днів при 8°C. Подібні результати були отримані для свіжозрізаної капусти, моркви та салату айсберг, оброблених 3–5 мг/л ClO_2 . Більше того, обробка ClO_2 позитивно впливає на склад легких сполук та вільних амінокислот у цитрусових, що призводить до збереження їхнього виразного смаку [23]. Крім того, сливи, оброблені ClO_2 , зберігають високі сенсорні властивості під час зберігання. Кілька досліджень показали, що сенсорні властивості свіжих продуктів можна покращити шляхом застосування ClO_2 . Наприклад, полуниця, чорниця та шовковиця, оброблені ClO_2 , продемонстрували кращі сенсорні показники, ніж необроблені контрольні сорти. Тим не менш, 20 мг/л ClO_2 суттєво вплинули на сенсорні властивості салату та капусти.

Застосування діоксиду хлору: ефективність та обмеження.

Завдяки своїй високій окислювальній здатності (у 2,5 рази вищій, ніж у хлору), ClO_2 ефективно інактивує мікроби з мінімальним часом контакту [7]. Найголовніше, що ClO_2 ефективний проти грампозитивних та грамнегативних бактерій, тоді як цвіль та дріжджі продемонстрували проміжну толерантність [8, 29]. Крім того, ClO_2 не реагує з органічними речовинами, утворюючи канцерогенні побічні продукти, такі як тригалометани, що робить ClO_2 ефективним у широкому діапазоні pH [7]. У Сполучених Штатах для обробки свіжих продуктів дозволено максимум 3 мг/л ClO_2 . У Європі після обробки ClO_2 необхідне промивання питною водою [7].

Порівняння ефективності дезінфекції різних санітаїзерів показало, що газоподібний ClO_2 , гідростатичний тиск та електролізована окислювальна вода були ефективнішими в інактивації мікробів. Середнє зниження мікробної активності газоподібним ClO_2 , гідростатичним тиском та електролізованою окислювальною водою становило 4,07, 3,94 та 3,01 log відповідно [29]. З іншого боку, середня мікробна інактивація водним ClO_2 (1,49 log) була меншою, ніж у газоподібного ClO_2 , проте вона все ще була вищою, ніж у дезінфікуючих засобів на основі хлору (1,12 log) [29]. Вища антимікробна активність газоподібного ClO_2 може пояснюватися його легшою доступністю для мікробів, розташованих у важкодоступних частинах свіжих продуктів. Крім того, газоподібний ClO_2 може легко дифундувати в тканини свіжих продуктів, отже, він може інактивувати інтерналізовані мікроби [29]. Однак робота з газоподібним ClO_2 є незручною, оскільки його потрібно виробляти на місці. Крім того, це дорого та вимагає технічної експертизи.

Основні обмеження ClO_2 для практичного застосування включають те, що він може бути неефективним у дозволених концентраціях; у деяких випадках він може впливати на якість оброблених свіжих продуктів. Оскільки ClO_2 є дуже вибухонебезпечним та токсичним для людини у вищих концентраціях, впровадження цієї технології обробки в промисловому масштабі є складним [10].

Висновки

Застосування діоксиду хлору в газоподібній та водній формах продемонструвало свою ефективність у контролі росту мікробів та збереженні якості свіжих продуктів, проте це значною мірою залежить від відповідного типу продукту та умов обробки. Газоподібний ClO_2 є ефективнішим, ніж водна форма. Тим

не менш, хоча водні розчини ClO_2 можуть бути простими у використанні, вони вимагають додаткового етапу промивання. ClO_2 , як у газоподібній, так і у водній формі, дестабілізує клітинні мембрани, змінює проникність мембран та порушує синтез білка у мікробів, а також впливає на біосинтез етилену та швидкість дихання у свіжих продуктах, що має вирішальне значення для підтримки їх якості. Загалом, початкове зниження мікробного навантаження значно впливає на мікробне забруднення під час зберігання свіжих продуктів, що призводить до подовження терміну придатності. Попередні дослідження показують, що концентрація ClO_2 та час експозиції мають вирішальне значення для визначення ефективності ClO_2 проти мікробів, але для розкриття механізмів, що лежать в основі регуляції якості свіжих продуктів за допомогою ClO_2 , потрібен цілісний підхід.

Перспективи подальших досліджень.

Сучасні дослідження дезінфекції за допомогою ClO_2 в основному зосереджені на бактерицидній дії ClO_2 ; останнім часом дослідження протигрибкової та противірусної дії ClO_2 привертають до себе увагу. Наразі ефективність ClO_2 переважно перевіряється на лабораторному рівні, що підкреслює необхідність проведення випробувань на промисловому рівні для різних видів свіжих продуктів. Розташування та хімічна доля газоподібного ClO_2 на оброблених свіжих продуктах недостатньо вивчені; тому подальші дослідження повинні бути зосереджені на цьому аспекті, який значною мірою ігнорувався в дослідженнях дезінфекції ClO_2 . Крім того, слід приділити увагу різним методам отримання ClO_2 та ефективності ClO_2 у поєднанні з іншими технологіями для післязбиральної якості та мікробної безпеки свіжих продуктів [10].

Література

1. CDC. National Outbreak Reporting System (NORS). Atlanta : CDC, 2018.
2. European Food Safety Authority. The European Union One Health 2019 Zoonoses Report // *EFSA Journal*. 2021. Vol. 19. Art. e06406. DOI: 10.2903/j.efsa.2021.6406.
3. WHO. WHO estimates of the global burden of foodborne diseases: foodborne disease burden epidemiology reference group 2007–2015. Geneva : WHO, 2015.
4. Chacha J. S., Zhang L., Ofoedu C. E., Suleiman R. A., Dotto J. M., Roobab U. та ін. Revisiting non-thermal food processing and preservation methods—action mechanisms, pros and cons: a technological update (2016–2021) // *Foods*. 2021. Vol. 10. Art. 1430. DOI: 10.3390/foods10061430.
5. Deng L. Z., Mujumdar A. S., Pan Z., Vidyarthi S. K., Xu J., Zielinska M. та ін. Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 60. P. 2481–2508. DOI: 10.1080/10408398.2019.1649633.
6. Joshi K., Mahendran R., Alagusundaram K., Norton T., Tiwari B. K. Novel disinfectants for fresh produce // *Trends in Food Science & Technology*. 2013. Vol. 34. P. 54–61. DOI: 10.1016/j.tifs.2013.08.008.
7. Praeger U., Herppich W. B., Hassenberg K. Aqueous chlorine dioxide treatment of horticultural produce: effects on microbial safety and produce quality—a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58. P. 318–333. DOI: 10.1080/10408398.2016.1169157.
8. Sun X., Baldwin E., Bai J. Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables—a review // *Food Control*. 2019. Vol. 95. P. 18–26. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.07.044.
9. FDA. Guidance for industry: guide to minimize microbial food safety hazards for fresh fruits and vegetables. Silver Spring : FDA, 2008.
10. Malka S. K., Park M.-H. Fresh produce safety and quality: chlorine dioxide's role // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 12. Art. 775629. DOI: 10.3389/fpls.2021.775629.
11. Singh S., Maji P. K., Lee Y. S., Gaikwad K. K. Applications of gaseous chlorine dioxide for antimicrobial food packaging: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2021. Vol. 19. P. 253–270. DOI: 10.1007/s10311-020-01085-8.
12. Ofori I., Maddila S., Lin J., Jonnalagadda S. B. Chlorine dioxide inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* in water: the kinetics and mechanism // *Journal of Water Process Engineering*. 2018. Vol. 26. P. 46–54. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.09.001.
13. Bridges D. F., Lacombe A., Wu V. C. H. Integrity of the *Escherichia coli* O157:H7 cell wall and membranes after chlorine dioxide treatment // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. Art. 888. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00888.
14. Ge Y., Zhang X., Shu L., Yang X. Kinetics and mechanisms of virus inactivation by chlorine dioxide in water treatment: a review // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2021. Vol. 106. P. 560–567. DOI: 10.1007/s00128-021-03137-3.
15. Zhu Z., Guo Y., Yu P., Wang X., Zhang X., Dong W. та ін. Chlorine dioxide inhibits the replication of porcine reproductive and respiratory syndrome virus by blocking viral attachment // *Infection, Genetics and Evolution*. 2019. Vol. 67. P. 78–87. DOI: 10.1016/j.meegid.2018.11.002.
16. Lin X., Chen G., Jin T. Z., Wen M., Wu J., Wen J. та ін. Extension of shelf life of semi-dry longan pulp with gaseous chlorine dioxide generating film // *International Journal of Food Microbiology*. 2021. Vol. 337. Art.

108938. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108938.
17. Zhou S., Hu C., Zhao G., Jin T., Sheen S., Han L. та ін. Novel generation systems of gaseous chlorine dioxide for *Salmonella* inactivation on fresh tomato // *Food Control*. 2018. Vol. 92. P. 479–487. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.05.025.
18. Park S. H., Kang D. H. Effect of temperature on chlorine dioxide inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* on spinach, tomatoes, stainless steel, and glass surfaces // *International Journal of Food Microbiology*. 2018. Vol. 275. P. 39–45. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.03.015.
19. Lee S. Y., Baek S. Y. Effect of chemical sanitizer combined with modified atmosphere packaging on inhibiting *Escherichia coli* O157:H7 in commercial spinach // *Food Microbiology*. 2008. Vol. 25. P. 582–587. DOI: 10.1016/j.fm.2008.02.003.
20. Annous B. A., Buckley D., Burke A. Evaluation of chlorine dioxide gas against four *Salmonella enterica* serovars artificially contaminated on whole blueberries // *Journal of Food Protection*. 2020. Vol. 83. P. 412–417. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-19-452.
21. Kingsley D. H., Annous B. A. Evaluation of steady-state gaseous chlorine dioxide treatment for the inactivation of Tulane virus on berry fruits // *Food and Environmental Virology*. 2019. Vol. 11. P. 214–219. DOI: 10.1007/s12560-019-09382-4.
22. Kingsley D. H., Perez-Perez R. E., Niemira B. A., Fan X. Evaluation of gaseous chlorine dioxide for the inactivation of Tulane virus on blueberries // *International Journal of Food Microbiology*. 2018. Vol. 273. P. 28–32. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.01.024.
23. Liu X., Jiao W., Du Y., Chen Q., Su Z., Fu M. Chlorine dioxide controls green mold caused by *Penicillium digitatum* in citrus fruits and the mechanism involved // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. Vol. 68. P. 13897–13905. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c05288.
24. Behlau F., Paloschi A., Marin T. G. S., Santos T. A., Ferreira H., Nascimento L. M. D. Chlorine dioxide, peroxyacetic acid, and calcium oxychloride for post-harvest decontamination of citrus fruit against *Xanthomonas citri* subsp. *citri* // *Crop Protection*. 2021. Vol. 146. Art. 105679. DOI: 10.1016/j.cropro.2021.105679.
25. Chiabrando V., Giuggioli N., Maghenzani M., Peano C., Giacalone G. Improving storability of strawberries with gaseous chlorine dioxide in perforated clamshell packaging // *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2018. Vol. 68. P. 141–148. DOI: 10.1515/pjfn-2017-0024.
26. Chen S., Wang H., Wang R., Fu Q., Zhang W. Effect of gaseous chlorine dioxide (ClO_2) with different concentrations and numbers of treatments on controlling berry decay and rachis browning of table grape // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2018. Vol. 42. Art. e13662. DOI: 10.1111/jfpp.13662.
27. Zhang B., Huang C., Zhang L., Wang J., Huang X., Zhao Y. та ін. Application of chlorine dioxide microcapsule sustained-release antibacterial films for preservation of mangos // *Journal of Food Science and Technology*. 2019. Vol. 56. P. 1095–1103. DOI: 10.1007/s13197-019-03636-6.
28. Lufu R., Ambaw A., Opara U. L. Water loss of fresh fruit: influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors // *Scientia Horticulturae*. 2020. Vol. 272. Art. 109519. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109519.
29. Yoon J. H., Lee S. Y. Comparison of the effectiveness of decontaminating strategies for fresh fruits and vegetables and related limitations // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58. P. 3189–3208. DOI: 10.1080/10408398.2017.1354813.

ON THE USE OF CHLORINE DIOXIDE FOR QUALITY AND SAFETY CONTROL OF FRESH PRODUCTS (LITERATURE REVIEW)

Mokienko A.V., Doctor of Medical Sciences, Senior Researcher
National University "Ostroh Academy", Ostroh, Rivne region

Abstract. Maintaining the microbial safety and quality of fresh fruits and vegetables is a global problem. Harmful microbes can contaminate fresh products at any stage - from farm to counter. Microbial contamination can affect the quality and shelf life of fresh products, and consumption of contaminated products can cause foodborne illnesses. In addition, modern consumers pay increasing attention to the freshness and appearance of fresh products. Therefore, disinfection methods are needed that not only reduce the microbial load, but also preserve the quality of fresh products. Chlorine dioxide (ClO_2) has become a better alternative to chlorine-based disinfectants. It has been shown that ClO_2 destabilizes cell membranes, changes their permeability and disrupts protein synthesis in microbes, and also affects ethylene biosynthesis and respiration rate in fresh produce, which is crucial for maintaining their quality. The effectiveness of gaseous and aqueous ClO_2 in inhibiting microbial growth immediately after processing (short-term effect) is substantiated compared to regulating microbial growth

during storage of fresh produce (long-term effect). The effect of ClO_2 application on preserving or improving the quality of fresh produce is considered in detail and a modern understanding of the mechanism of action of ClO_2 against microbes affecting fresh produce is presented. The need for industrial-scale testing of ClO_2 for different types of fresh produce is stated; further studies of the chemistry of ClO_2 reactions on processed fresh produce are indicated; evaluation of different methods of obtaining ClO_2 and the effectiveness of ClO_2 in combination with other technologies for post-harvest quality and microbial safety of fresh produce.

Key words: chlorine dioxide, fresh produce, microbial safety, product quality, storage, shelf life, antimicrobial mechanism.

References

1. CDC (2018). National Outbreak Reporting System (NORS). Atlanta, GA: CDC.
2. European Food Safety Authority (2021). The European Union One Health 2019 Zoonoses Report. EFSA J. 19:e06406. 10.2903/j.efsa.2021.6406
3. WHO (2015). WHO estimates of the global burden of foodborne diseases: foodborne disease burden epidemiology reference group 2007-2015. Geneva: WHO.
4. Chacha J. S., Zhang L., Ofoedu C. E., Suleiman R. A., Dotto J. M., Roobab U., et al. (2021). Revisiting Non-Thermal Food Processing and Preservation Methods-Action Mechanisms, Pros and Cons: A Technological Update (2016-2021). Foods 10:foods10061430. 10.3390/foods10061430
5. Deng L. Z., Mujumdar A. S., Pan Z., Vidyarthi S. K., Xu J., Zielinska M., et al. (2020). Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 60 2481–2508. 10.1080/10408398.2019.1649633
6. Joshi K., Mahendran R., Alagusundaram K., Norton T., Tiwari B. K. (2013). Novel disinfectants for fresh produce. Trends Food Sci. Technol. 34 54–61. 10.1016/j.tifs.2013.08.008
7. Praeger U., Herppich W. B., Hassenberg K. (2018). Aqueous chlorine dioxide treatment of horticultural produce: Effects on microbial safety and produce quality-A review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 58 318–333. 10.1080/10408398.2016.1169157
8. Sun X., Baldwin E., Bai J. (2019). Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables – A review. Food Control 95 18–26. 10.1016/j.foodcont.2018.07.044
9. FDA (2008). Guidance for industry: guide to minimize microbial food safety hazards for fresh fruits and vegetables. Silver Spring: FDA.
10. Siva Kumar Malka, Me-Hea Park. Fresh Produce Safety and Quality: Chlorine Dioxide's Role. Front Plant Sci. 2022 Jan 11;12:775629. doi: [10.3389/fpls.2021.775629](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.775629)
11. Singh S., Maji P. K., Lee Y. S., Gaikwad K. K. (2021). Applications of gaseous chlorine dioxide for antimicrobial food packaging: a review. Environ. Chem. Lett. 19 253–270. 10.1007/s10311-020-01085-8
12. Ofori I., Maddila S., Lin J., Jonnalagadda S. B. (2018). Chlorine dioxide inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* in water: The kinetics and mechanism. J. Water Process Engine. 26 46–54. 10.1016/j.jwpe.2018.09.001
13. Bridges D. F., Lacombe A., Wu V. C. H. (2020). Integrity of the *Escherichia coli* O157:H7 Cell Wall and Membranes After Chlorine Dioxide Treatment. Front. Microbiol. 11:888. 10.3389/fmicb.2020.00888
14. Ge Y., Zhang X., Shu L., Yang X. (2021). Kinetics and Mechanisms of Virus Inactivation by Chlorine Dioxide in Water Treatment: A Review. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 106 560–567. 10.1007/s00128-021-03137-3
15. Zhu Z., Guo Y., Yu P., Wang X., Zhang X., Dong W., et al. (2019). Chlorine dioxide inhibits the replication of porcine reproductive and respiratory syndrome virus by blocking viral attachment. Infect. Genet. Evol. 67 78–87. 10.1016/j.meegid.2018.11.002
16. Lin X., Chen G., Jin T. Z., Wen M., Wu J., Wen J., et al. (2021). Extension of shelf life of semi-dry longan pulp with gaseous chlorine dioxide generating film. Int. J. Food Microbiol. 337:108938. 10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108938
17. Zhou S., Hu C., Zhao G., Jin T., Sheen S., Han L., et al. (2018). Novel generation systems of gaseous chlorine dioxide for *Salmonella* inactivation on fresh tomato. Food Control 92 479–487. 10.1016/j.foodcont.2018.05.025
18. Park S. H., Kang D. H. (2018). Effect of temperature on chlorine dioxide inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* on spinach, tomatoes, stainless steel, and glass surfaces. Int. J. Food Microbiol. 275 39–45. 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.03.015
19. Lee S. Y., Baek S. Y. (2008). Effect of chemical sanitizer combined with modified atmosphere packaging on inhibiting *Escherichia coli* O157:H7 in commercial spinach. Food Microbiol. 25 582–587. 10.1016/j.fm.2008.02.003
20. Annous B. A., Buckley D., Burke A. (2020). Evaluation of Chlorine Dioxide Gas against Four *Salmonella enterica* Serovars Artificially Contaminated on Whole Blueberries. J. Food Prot. 83 412–417. 10.4315/0362-028X.JFP-19-452
21. Kingsley D. H., Annous B. A. (2019). Evaluation of Steady-State Gaseous Chlorine Dioxide Treatment for the

- Inactivation of Tulane virus on Berry Fruits. Food Environ. Virol. 11 214–219. 10.1007/s12560-019-09382-4
22. Kingsley D. H., Perez-Perez R. E., Niemira B. A., Fan X. (2018). Evaluation of gaseous chlorine dioxide for the inactivation of Tulane virus on blueberries. Int. J. Food Microbiol. 273 28–32. 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.01.024
23. Liu X., Jiao W., Du Y., Chen Q., Su Z., Fu M. (2020). Chlorine Dioxide Controls Green Mold Caused by *Penicillium digitatum* in Citrus Fruits and the Mechanism Involved. J. Agric. Food Chem. 68 13897–13905. 10.1021/acs.jafc.0c05288
24. Behlau F., Paloschi A., Marin T. G. S., Santos T. A., Ferreira H., Nascimento L. M. D. (2021). Chlorine dioxide, peroxyacetic acid, and calcium oxychloride for post-harvest decontamination of citrus fruit against *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, causal agent of citrus canker. Crop Protect. 146:105679. 10.1016/j.cropro.2021.105679
25. Chiabrando V., Giuggioli N., Maghenzani M., Peano C., Giacalone G. (2018). Improving Storability of Strawberries with Gaseous Chlorine Dioxide in Perforated Clamshell Packaging. Polish J. Food Nutrit. Sci. 68 141–148. 10.1515/pjfn-2017-0024
26. Chen S., Wang H., Wang R., Fu Q., Zhang W. (2018). Effect of gaseous chlorine dioxide (ClO₂) with different concentrations and numbers of treatments on controlling berry decay and rachis browning of table grape. J. Food Proces. Preservat. 42:13662. 10.1111/jfpp.13662
27. Zhang B., Huang C., Zhang L., Wang J., Huang X., Zhao Y., et al. (2019). Application of chlorine dioxide microcapsule sustained-release antibacterial films for preservation of mangos. J. Food Sci. Technol. 56 1095–1103. 10.1007/s13197-019-03636-6
28. Lufu R., Ambaw A., Opara U. L. (2020). Water loss of fresh fruit: Influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors. Sci. Horticult. 272:109519. 10.1016/j.scienta.2020.109519
29. Yoon J. H., Lee S. Y. (2018). Review: Comparison of the Effectiveness of Decontaminating Strategies for Fresh Fruits and Vegetables and Related Limitations. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 58 3189–3208. 10.1080/10408398.2017.1354813
- Отримано в редакцію 03.12.2025
Прийнято до друку 18.12.2025
Розміщено в інтернеті 29.12.2025
- Received 03.12.2025
Approved 18.12.2025
Available in Internet 29.12.2025

УДК 532.5:628.511:631.243

DOI: DOI 10.15673/swonaft.v89i2.3405

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ПИЛОВИДІЛЕННЯ В ЗЕРНОВИХ ТЕРМІНАЛАХ: ВІД ФІЗИКИ ЕЖЕКЦІЇ ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ЗНЕПИЛЕННЯ

¹Гапонюк О.І., д.т.н., проф., ²Ткаченко В.М., здобувач PhD
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

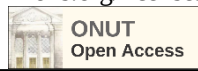
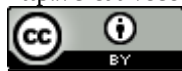
ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-9577-4417>; ²<https://orcid.org/0009-0003-0927-2985>

E-mail: ¹oleg_odessa@me.com; ²vitalis.tkachenko@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under Vthe Creative Commons Attribution International License (CC By).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Анотація. У поданій статті здійснено комплексний аналіз проблематики модернізації систем знепилення на сучасних зернових терміналах, де експоненційне зростання інтенсивності вантажопотоків вступає у гострий конфлікт із дедалі жорсткішими екологічними нормативами та імперативами енергоефективності. Автори аргументовано доводять, що традиційна інженерна парадигма, яка базується на застосуванні високоенергоємних аспіраційних мереж для «ліквідації наслідків» пилоутворення, вичерпала свій технічний та економічний ресурс. На основі глибокого дослідження фізики аеродинамічних процесів, зокрема ефектів ежекції та «поршневої» дії гравітаційного потоку зерна, обґрунтовано фундаментальну неспроможність класичних розрахункових моделей (рівняння Далла Валле)