ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2520
https://elibrary.ru/QUADVY

Обзорная статья
https://fptt.ru

Применение озона в хранении и переработке зерна (обзор)

О. Н. Бахчевников[1,*], А. В. Брагинец[1,2]

[1] *Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия*

[2] *Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия*

Поступила в редакцию: 06.02.2024
Принята после рецензирования: 29.02.2024
Принята к публикации: 05.03.2024

**О. Н. Бахчевников: oleg-b@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-3362-5627*
А. В. Брагинец: https://orcid.org/0000-0002-7188-4179

© О. Н. Бахчевников, А. В. Брагинец, 2024

Аннотация.
«Зеленые» технологии находят широкое применение в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, в том числе для обеззараживания и детоксикации зерна и продуктов его переработки. С целью обеззараживания все чаще используется озонирование. Однако информация о результатах научных исследований по применению озона в зерновой отрасли является разрозненной и неполной. Цель исследования – обзор и критический анализ научных публикаций, посвященных применению озона в переработке и хранении зерна.
Выполнен поиск научной литературы, по ключевым словам, за 2013–2023 гг. в научных библиографических базах eLIBRARY.RU, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI и Springer Link, ее отбор, синтез данных и их анализ.
Озонирование применяют в хранении и переработке зерна в качестве «зеленой» технологии, обеспечивающей обеззараживание и детоксикацию сырья и готовой продукции без вреда для здоровья человека и животных, а также увеличение продолжительности их хранения. В результате экспериментальных исследований было доказано, что озон обладает антимикробным, фунгицидным, инсектицидным и деградирующим микотоксины и пестициды действием. В то же время озон не снижает качества зерна и хлебопродуктов, быстро распадается и не образует токсичных соединений. Установлено, что на эффективность обработки озоном влияют многие факторы: влажность сырья, концентрация озона, длительность обработки, pH и температура среды, форма применения. Результаты исследований показывают положительное влияние озонирования на качество пшеничной муки и производимых из нее продуктов, но требуется дополнительное изучение этого эффекта для установления рациональных параметров процесса. Установлено, что озонирование зерна и продуктов его переработки является рентабельной технологией.
Озонирование может найти широкое применение в качестве «зеленой» технологии, обеспечивающей обеззараживание и детоксикацию зернового сырья и готовой продукции. Озонирование обладает высоким потенциалом применения в хранении и переработке зерна.

Ключевые слова. Озон, озонирование, зерно, зерновые продукты, обеззараживание, деконтаминация, дезинсекция, качество

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания «Аграрный научный центр «Донской» (тема № 0505-2022-0007).

Для цитирования: Бахчевников О. Н., Брагинец А. В. Применение озона в хранении и переработке зерна (обзор)// Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 483–494. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2520

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2520
https://elibrary.ru/QUADVY

Review article
Available online at https://fptt.ru/en

Ozone in Grain Storage and Processing: Review

Oleg N. Bakhchevnikov[1,*], Andrey V. Braginets[1,2]

[1] *Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd, Russia*

[2] *Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia*

Received: 06.02.2024
Revised: 29.02.2024
Accepted: 05.03.2024

**Oleg N. Bakhchevnikov: oleg-b@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-3362-5627*
Andrey V. Braginets, https://orcid.org/0000-0002-7188-4179

© O.N. Bakhchevnikov, A.V. Braginets, 2024

Abstract.
Green technologies are gaining popularity in agriculture and the food industry, including such areas as disinfection and detoxification of grain and its products. Ozonation is an effective disinfection procedure. However, scientific data on grain ozonation are scattered and incomplete. The article offers a review and a critical analysis of scientific publications that feature ozonation in grain processing and storage.
The keyword search covered publications indexed in eLIBRARY.RU, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI, and Springer Link in 2013–2023.
In grain storage and processing, ozonation serves as a green technology of disinfection and detoxification of raw materials and finished products. It increases storage life but does not affect human or animal health. Ozone proved to possess antimicrobial, fungicidal, and insecticidal properties. It was able to degrade mycotoxins and pesticides. The publications reviewed did not report any evidence that ozone reduces the quality of grain or bakery products. On the contrary, it disintegrated quickly, without developing any toxic compounds. Ozone treatment depends on many factors, e.g., raw material humidity, ozone concentration, treatment time, environmental pH and temperature, form of application, etc. In general, ozonation was reported to improve the quality of wheat flour and its products. However, rational variables require additional research. Ozonation of grain and its products was often described as cost-effective.
Ozonation has the potential to find extensive application as a green technology that ensures disinfection and detoxification of grain raw materials and finished products, which also means good prospects for grain storage and processing.

Keywords. Ozone, ozonation, grain, cereal products, disinfection, quality

Funding. The research was part of State Assignment no. 0505-2022-0007 to the Agricultural Research Center Donskoy.

For citation: Bakhchevnikov ON, Braginets AV. Ozone in Grain Storage and Processing: Review. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(3):483–494. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2520

Введение

В настоящее время в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, в том числе при производстве и переработке зерна, все более активно применяются «зеленые» (экологические) технологии, являющиеся менее вредными для здоровья людей и животных по сравнению с традиционными технологическими схемами [1, 2]. Важное значение имеет использование «зеленых» технологий для обеззараживания и детоксикации зерна и продуктов его переработки [3].

Из имеющихся технологий обеззараживания и детоксикации в зерновом производстве в наибольшей степени зарекомендовало себя озонирование, т. е. обработка зерна и зерновых продуктов газообразным или растворенным в воде озоном [4, 5]. В последнее время озон находит применение для уничтожения патогенных микроорганизмов и разрушения микотоксинов и пестицидов, борьбы с амбарными вредителями, а также для улучшения качества зерна и муки [6, 7].

Преимущество использования озона в сельском хозяйстве и пищевой промышленности заключается в том, что он легко превращается в безвредный кислород с минимальными остатками, что исключает необходимость его удаления из обрабатываемого продукта [8]. Поэтому его использование представляет собой перспективную «зеленую» технологию, способную повысить безопасность зерна и зерновых продуктов [9].

Однако информация о результатах научных исследований по применению озона в зерновой отрасли является разрозненной и часто неполной в некоторых аспектах.

Вышеизложенное показало необходимость произвести систематический обзор и критический анализ научных публикаций, посвященных использованию озона в переработке и хранении зерна, в том числе

деконтаминации, разрушении микотоксинов и пестицидов, уничтожении насекомых-вредителей, влиянии на качество зерна и муки, а также достоинствам и недостаткам данного способа обработки.

Целью исследования является систематический обзор и критический анализ научных публикаций, посвященных применению озона в переработке и хранении зерна.

Объекты и методы исследования

Работа над обзором включала: поиск научной литературы по заявленной теме, ее отбор, обработку данных и их анализ, синтез выводов.

Отбор и систематический обзор научных статей по рассматриваемой тематике был выполнен по методике H. Snyder и R. G. Toracco, описывающей последовательность отбора публикаций, их критического анализа и синтеза заключительных выводов [10, 11].

Для отбора научных статей на английском и русском языках был выполнен поиск, по ключевым словам, и их сочетаниям в научных библиографических базах eLIBRARY.RU, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI и Springer Link. В выбранных статьях были просмотрены пристатейные списки литературы для нахождения дополнительных релевантных источников информации. Поиск произвели по следующим типам публикаций: Article, Review, Conference Paper, Chapter. При выборе исследований для настоящего обзора приоритет отдавали публикациям с наибольшим количеством цитирований (за исключением новейших статей).

В качестве временных рамок для отбора рассматриваемых в данном обзоре статей был принят период 2013–2023 гг. Научные статьи, опубликованные ранее 2013 г., были включены в настоящий обзор в случае отсутствия более новых публикаций по конкретным аспектам рассматриваемой тематики.

Результаты и их обсуждение

Характеристика озона. Озон O_3 – это газ, являющийся аллотропной трехатомной формой кислорода. Молекулы озона O_3 нестабильны и довольно быстро превращаются в кислород [12]. Скорость этого процесса зависит от температуры и давления окружающей среды [13]. Отсутствие вредных побочных продуктов распада является достоинством технологии озонирования, обуславливающим ее развитие в качестве перспективной «зеленой» технологии, обеспечивающей безопасность и качество продуктов питания и кормов [8].

Озон применяют в газообразной форме – в виде смеси с воздухом (концентрация 1–6 %), а также в виде водного раствора (концентрация 5–14 %).

Механизм действия озона. Механизм действия озона на органические вещества, составляющие ткани живых организмов, состоит в их активном окислении [6]. Озон вступает в химические реакции с различными веществами, в том числе токсичными [8]. Взаимодействуя с такими токсичными веществами, как микотоксины и пестициды, озон вступает с ними в химические реакции, превращая их в менее токсичные или неядовитые вещества [14].

При взаимодействии с веществами, образующими органеллы клеток микроорганизмов, озон окисляет их, нарушая тем самым их жизнедеятельность и приводя к гибели [15] (рис. 1). Результаты исследований показывают, что существует два механизма инактивации микроорганизмов под действием озона [8]. Первый из них состоит в окислении сульфгидрильных групп и аминокислот, входящих в состав пептидов, белков и ферментов органелл клетки [12]. В ходе второго происходит окисление полиненасыщенных жирных кислот в составе оболочки клетки [1]. Особенно критичным для микроорганизмов является повреждение

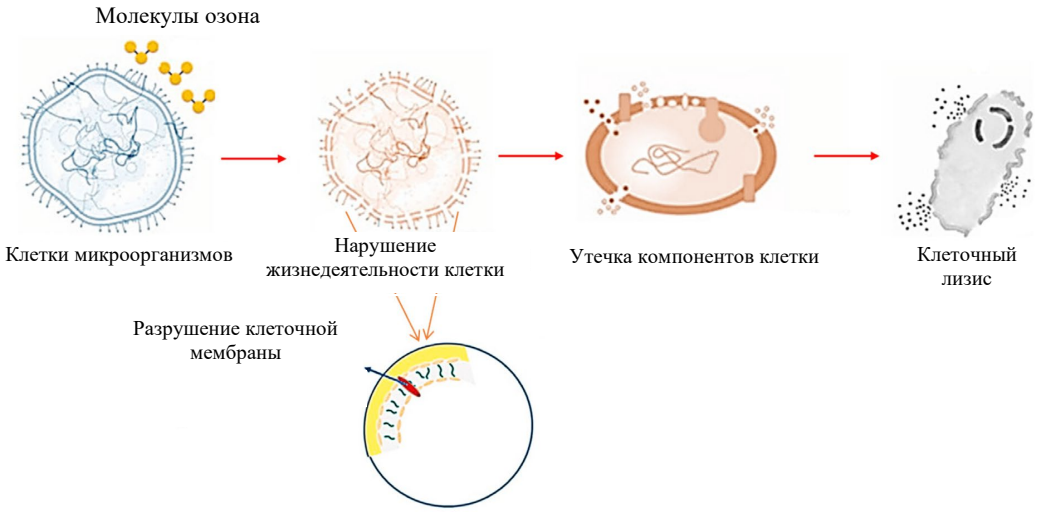


Рисунок 1. Схема инактивации микроорганизмов под действием озона [13]

Figure 1. Inactivation of microorganisms with ozone [13]

в результате этих процессов клеточной оболочки, что приводит к лизису и их гибели [6].

Обеззараживание. Озонирование значительно снижает содержание патогенных микрорганизмов в зерне и зерновых продуктах [8, 15]. Озон уничтожает патогенные пищевые бактерии (*Escherichia coli*, *Salmonella* и др.), плесневые грибы (*Alternaria*, *Aspergillus*), а также их споры [13, 16].

Механизм действия озона на патогенные одноклеточные организмы состоит в окислении им веществ, входящих в состав клеточных оболочек, что приводит к их разрушению и гибели всей клетки [13, 15].

Опубликованные результаты исследований показывают, что озон эффективно воздействует на все виды бактерий [8, 17]. Результаты новейших исследований показывают, что озон более эффективно действует на грамотрицательные бактерии [13]. K. Rangel сообщает, что воздействие газообразного озона значительно снизило жизнеспособность клеток грамотрицательных бактерий *E. coli* [18].

Озон эффективно используется для борьбы с плесневыми грибами, в том числе наиболее распространенными *Aspergillus* и *Fusarium*, и их спорами [13]. G. D. Savi установил, что действие газообразного озона (концентрация 60 мкмоль/моль в течение 40–120 мин.) эффективно подавляло рост грибов *Fusarium graminearum* и *Penicillium citrinum* [19]. L. Levinskaite сообщает, что обработка зерна газообразным озоном в течение 1 ч привела к значимому ингибированию роста плесневых грибов *Aspergillus*, *Fusarium* и *Penicillium* [20]. M. Beber-Rodrigues исследовал действие газообразного озона (10–40 мг/л) на грибки, поражающие рис [21]. Результаты его исследований показали значительное снижение их содержания, причем увеличение концентрации газа и длительности воздействия усиливало эффективность обработки.

Эффективность действия озона зависит от его агрегатного состояния (газ или водный раствор), концентрации и продолжительности действия, вида или штамма микроорганизмов, уровня pH, температуры и влажности окружающей среды [13]. Результаты исследований показали, что эффект от озонирования увеличивается при повышении концентрации озона, продолжительности его воздействия и температуры окружающей среды [15, 22]. Увеличение влажности зерна положительно сказывается на эффективности обеззараживания [23].

Несмотря на имеющиеся результаты, для широкого применения озонирования с целью уничтожения патогенных микроорганизмов, поражающих зерно, необходимо провести дополнительные исследования для установления рациональных параметров его выполнения.

Деградация микотоксинов. Плесневые грибы не только поражают зерно и продукты его переработки, делая их непригодными к употреблению, но и выделяют вторичные метаболиты – микотоксины, опасные для здоровья человека и животных. Одним из наиболее эффективных способов разрушения (деградации) микотоксинов, загрязняющих зерно и зерновые продукты, является озонирование [24].

Механизм действия озона на микотоксины состоит в их окислении с последующим образованием нетоксичных или малотоксичных низкомолекулярных химических соединений [25]. При окислении озон в основном действует на функциональные группы в молекулах микотоксинов, такие как фурановое кольцо в афлатоксинах, то степень деградации микотоксинов озоном зависит от структуры их молекул и расположения в них функциональных групп [26–28].

Озон эффективно снижает содержание в зерне таких микотоксинов, как фумонизины, охратоксин А, афлатоксины, зеараленон, дезоксиниваленол, цитринин и патулин [14].

Особенно эффективен озон для деградации афлатоксинов [27]. В результате его действия молекулы афлатоксинов расщепляются до органических кислот, альдегидов и кетонов [26, 29].

В результате экспериментов показана эффективность озонирования для разложения дезоксиниваленола. L. Wang сообщает, что озонирование является эффективным и быстрым способом деградации дезоксиниваленола в зерне пшеницы и цельнозерновой муке [30]. Его содержание снизилось с 3,89 до 0,83 мг/кг при обработке газообразным озоном в концентрации 100 мг/л в течение 60 мин.

В последнее время опубликованы многочисленные статьи, посвященные эффективности деградации микотоксинов озоном при хранении и переработке зерна. Некоторые результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Данные свидетельствуют о том, что наблюдается значительная вариация концентрации озона и продолжительности его действия при обработке с целью деградации микотоксинов. Результаты проведенных исследований доказывают высокую эффективность обработки зерна и муки газообразным озоном, хотя на их базе сложно сделать однозначное заключение о рациональных параметрах озонирования. Можно сделать вывод, что степень деградации микотоксинов зависит от концентрации озона и длительности его действия – их увеличение приводит к повышению эффективности обработки.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что озон более эффективно разлагает микотоксины при более высокой влажности зерна и зерновых продуктов [25, 36]. Это доказано в исследовании L. Qi, согласно которому скорость разложения зеараленона и охратоксина А увеличивалась по мере увлажнения зерна кукурузы водой [37]. В тоже время большинство исследований демонстрирует более высокую эффективность обработки зерна газообразным озоном, чем его водным раствором [38]. Эффективность обработки озоном также увеличивается при повышении температуры [8].

Обработка зерна озоном является потенциально эффективной и экологически безопасной технологией снижения содержания микотоксинов в зерне, после

Таблица 1. Результаты экспериментов по использованию озона для уменьшения содержания микотоксинов в зерновых продуктах

Table 1. Ozonation as a means of reducing mycotoxins in grain products: experimental results

Результаты исследования	Продукт	Продолжительность обработки, мин	Концентрация газообразного озона	Микотоксин	Уменьшение содержания микотоксина, %	Источники
A. P. S. Alexandre и др., 2019	Кукурузная мука	10	52 г/м^3	Зеараленон	56	[31]
Y. D. Porto и др., 2019	Измельченная кукуруза	480	60 г/м^3	Афлатоксин B_1	55	[27]
K. Zhuang и др., 2020	Зерно пшеницы, пшеничная мука	120	60 мг/л	Дезоксиниваленол	66	[32]
S. Krstović и др., 2021	Измельченная кукуруза	180	100 мг/л	Дезоксиниваленол, зеараленон, охратоксин	70	[33]
C. Shuai и др., 2022	Зерно пшеницы и кукурузы	480	3 мг/л	Дезоксиниваленол	40	[34]
B. Purar и др., 2022	Зерно кукурузы	180	85 мг/л	Дезоксиниваленол, зеараленон	52	[35]

которой почти не остается токсичных веществ. Но себестоимость технологии озонирования остается относительно высокой из-за сложности получения озона [25].

Большая часть изученных статей излагает результаты экспериментов по деградации лишь одного или нескольких конкретных микотоксинов, характерных для зернового производства, но практически отсутствуют исследования по обезвреживанию всего комплекса микотоксинов, обычно содержащихся в зерне. Поэтому можно сделать вывод о необходимости установления параметров, при которых воздействие озона способно обезвредить большинство видов микотоксинов.

Разрушение пестицидов. Накапливающиеся в поверхностных слоях зерна, особенно в рисе, в процессе его выращивания пестициды являются источником опасности для человека и сельскохозяйственных животных. Озон является эффективным средством для очищения зерна от остатков пестицидов [39, 40].

Механизм действия озона на пестициды состоит в окислении входящих в их состав высокомолекулярных веществ [41]. При реакции озона с органическими пестицидами происходит разрушение ненасыщенных алифатических углеводородов, таких как алкены и алкины путем разрыва углеродных цепей и раскрытия бензольных колец, а также окисление других функциональных групп [42]. Низкомолекулярные соединения, образующиеся в дальнейшем в результате реакции озона с ненасыщенными углеродными цепями в молекулах пестицидов, такие как кислоты, спирты, амины, в основном растворимы в воде. Поэтому они могут быть легко смыты с зерна водой. Для удаления пестицидов эффективна обработка зерна водным раствором озона [40].

M. de Avila и др. исследовали действие газообразного озона в концентрации 3 мг/л на загрязненные пестицидами зерна риса [43]. Они установили, что озон эффективно разлагает остатки пестицидов бифентрина и дельтаметрина, удаляя, 91,9 и 92,7 % соответственно.

R. de Freitas и др. изучили процесс деградации остатков пиримифос-метила в зерне кукурузы под действием газообразного озона в концентрации 0,86 мг/л [44]. Они пришли к выводу, что озон разложил более 91 % остатков пиримифос-метила, причем эффективность возрастала прямо пропорционально продолжительности воздействия газа.

G. D. Savi и др. проанализировали процесс уменьшения остатков дельтаметрина и фенитротиона в хранящемся зерне пшеницы и рассмотрели разложение остатков бифентрина и пиримифос-метила в зерне хранящейся пшеницы под действием газообразного озона в концентрации 60 мкмоль/моль [45, 46]. Исследование завершилось тем, что озон разлагает остатки этих пестицидов: бифентрин после 180 мин. действия – на 37,5 %, а пиримифос-метил после 30 мин. – на 71,1 %.

Результаты исследований по разложению остатков пестицидов озоном представлены в таблице 2.

Эффективность озонирования для разрушения пестицидов имеет прямо пропорциональную зависимость от концентрации озона, температуры окружающей среды и длительности обработки и улучшается при увеличении их значений [41, 47].

Имеется информация о положительном влиянии высокой влажности на эффективность действия озона на пестициды. G. D. Savi и др. определили, что при обработке газообразным озоном зерна пшеницы влажностью

Таблица 2. Результаты исследований по разложению остатков пестицидов в зерне под действием озона

Table 2. Decomposition of pesticide residues in grain after ozonation

Результаты исследования	Вид сырья	Продолжительность озонирования, мин	Концентрация газообразного озона	Пестицид	Уменьшение содержания пестицида, %	Источники
De Avila M. B. R. и др., 2017	Зерна риса	600	3 мг/л	Бифетрин Дельтаметрин	91,9 92,7	[43]
De Freitas R. и др., 2017	Зерна кукурузы	60	0,86 мг/л	Пиримифосметил	91	[44]
Savi G. D. и др., 2015	Зерно пшеницы	180	60 мкмоль/моль	Дельтаметрин Фенитротион	66,7 89,8	[45]
Savi G. D. и др., 2016	Зерно пшеницы	180 30	60 мкмоль/моль	Бифентрин Пиримифосметил	37,5 71,1	[46]

12 % разрушение пестицидов составило 80,6 % против 88,2 % для зерна влажностью 20 % [45].

Исследования показали, что обработка зерна озоном в газообразной или водной форме экономически эффективна для разложения пестицидов [48]. Такая обработка применима для зерна, используемого на кормовые и пищевые цели, так как безопасна для животных и человека [48].

Несмотря на имеющиеся положительные результаты, для широкого применения озонирования с целью удаления остатков пестицидов в зерне нужно провести дополнительные исследования с целью установления рациональных параметров процесса, эффективных для разрушения большинства известных пестицидов.

Борьба с насекомыми-вредителями зерна. Озонирование является действенным средством для борьбы с насекомыми, повреждающими зерно и зерновые продукты во время хранения [8, 49]. Эффективность воздействия газообразного озона на насекомых-вредителей различных видов составляет от 70 до 100 % [50, 51].

Активно ведутся исследования по эффективности озона в борьбе с насекомыми-вредителями зерна. X. Dong и др. выявили эффективность обработки зерен ячменя газообразным озоном в течение 24 ч для уничтожения насекомых зерновой точильщик (*Rhyzopertha dominica*) и хрущак малый (*Tribolium castaneum*), включая их яйца [52]. И. В. Баскаков сообщает, что в результате обработки зерна газообразным озоном концентрацией 5–15 мг/м^3 в течение 60 мин. погибли 86 % особей амбарного долгоносика и 90,5 % зерновой моли [53]. Он установил, что для уничтожения булавоусого хрущака (*Tribolium confusum* L.) необходима концентрация озона более 1935 мг·мин./м^3 и длительность обработки не менее 460 мин. [54].

Но при обработке хранящегося зерна следует учитывать, что эффективность действия озона на насекомых зависит от стадии их развития [55–57]. Наиболее подвержены действию озона взрослые насекомые, а меньше всего – их яйца, что обусловлено наличием плотного внешнего слоя, создающего барьер для поступления газа [50]. В качестве примера можно привести результаты исследования A. A. Isikber и др, которые выяснили, что в результате обработки зерна газообразным озоном в продолжение 120 мин. с концентрацией 13,9 мг/л полностью погибли взрослые особи, личинки и куколки мельничной огневки (*Ephestia kuehniella*), но часть яиц не пострадала [50]. Об аналогичных результатах сообщает и L. S. Hansen: в результате действия газообразного озона (131 мг/л в течение 8 суток) была обеспечена полная гибель насекомых долгоносик амбарный обыкновенный (*Sitophilus granarius*) и южная амбарная огнёвка (*Plodia interpunctella*) всех стадий развития, кроме яиц [58]. Анализ результатов исследований показал, что для полного уничтожения насекомых и их яиц в хранящемся зерне необходимо обеспечить значительную продолжительность его действия [8].

В результате исследований было установлено, что для обеспечения уничтожения насекомых-вредителей зерна необходимо обеспечивать его высокую концентрацию в течение длительного времени [59, 60]. Для каждого вида насекомых существует определенная пороговая концентрация озона, обеспечивающая его действенность.

Температура окружающей среды не оказывает существенного влияния на эффективность действия озона против насекомых [58]. При повышенной влажности проникновение озона в хранящемся зерне замедляется, что приводит к необходимости увеличения длительности обработки для уничтожения насекомых [61].

Таким образом, озон является экологически безопасной альтернативой химическим фумигантам при уничтожении насекомых-вредителей зерна и зерновых продуктов.

Влияние на качество зерна и продуктов его переработки. Важное значение имеют новые технологии повышения качества муки и хлеба [62]. В результате экспериментальных исследований установлено, что озон не оказывает влияния на содержание белка, золы и жиров в пшеничной муке [8, 63, 64]. L. Wang и др.

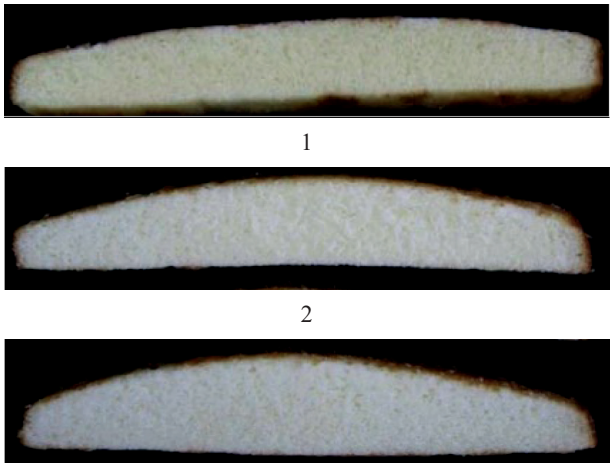
пришли к выводу, что содержание аминокислот в зерне пшеницы осталось неизменным после его обработки озоном концентрации 75 мг/л в течение 90 мин. [30]. В исследовании M. Dubois было показано, что содержание витаминов в зерне пшеницы не изменяется в результате обработки озоном [65]. Это является достоинством способа озонирования перед другими технологиями воздействия на зерно.

Обработка зерна и муки газообразным озоном приводит к снижению активности ферментов, в частности α-амилазы и полифенолоксидазы [66, 67], что имеет важное значение при их хранении [68]. Срок хранения зерна и муки, обработанных газообразным озоном, увеличивается как за счет обеззараживающего эффекта, так и за счет снижения в них ферментной активности [68–70].

Озонирование пшеничной муки положительно влияет на качество приготовленного из нее теста [8]. Озонирование увеличивает прочность теста и время его термостабильности [71]. Обработка озоном зерна и муки снижает значение их pH по причине окисления крахмала, что полезно для длительного хранения, причем увеличение продолжительности обработки и концентрации озона усиливает этот эффект [72]. Таким образом, озон может служить средством для улучшения качества теста, не влияющим на его питательную ценность.

С увеличением продолжительности озонирования пшеничной муки повышается твердость испеченного из нее хлеба, что неприемлемо для потребителей [73].

Важным потребительским свойством пшеничной муки является ее белизна. Озонирование муки увеличивает ее белизну, которая повышается с увеличением концентрации озона [71, 72]. Озон является лучшим отбеливающим агентом для пшеничной муки, чем химические отбеливатели, так как исключаются риски, связанные с остаточными уровнями химикатов, и обеспечивается безопасность потребителей [8].



1

2

3

Рисунок 2. Пироги из пшеничной муки, обработанной озоном [76]: 1 – контроль (без обработки); 2 – обработка в течение 10 мин.; 3 – обработка в течение 35 мин.

Figure 2. Pies made from ozonated wheat flour [76]: 1 – control (unprocessed flour); 2 – after 10 min of ozonation; 3 – after 35 min of ozonation

В некоторых исследованиях была выполнена оценка качества продуктов из пшеничной муки, подвергнутой озонированию. Лапша, изготовленная из озонированной пшеничной муки, имела более длительный срок хранения и лучшую белизну [66, 73]. Оценка качества хлеба, изготовленного из озонированной пшеничной муки, показала увеличение удельного объема буханки, благоприятное изменение ее внешнего вида и внутренней структуры [71, 74, 75]. S. Chittrakorn и др. оценили значительное увеличение объема пирогов, испеченных из пшеничной муки, предварительно обработанной газообразным озоном в течение 10–35 мин. (рис. 2) [76].

Озон может быть использован для обработки пшеничной муки с целью улучшения качества приготовляемых из нее продуктов и увеличения срока их хранения.

Достоинства и недостатки применения озона. Главное достоинство применения озона при хранении и переработке зерна – это его универсальность, заключающаяся в эффективном действии на патогенные бактерии, плесневые грибы, насекомых-вредителей, микотоксины и пестициды [1, 16].

Из двух форм озона – газообразной, в виде смеси с воздухом и в виде водного раствора, наибольшее распространение в зерновом производстве получила первая [1]. Причиной этого является простота применения и более низкая стоимость необходимого оборудования [4]. Значительным недостатком применения озона в виде раствора является необходимость предварительной очистки воды из-за риска образования ядовитых веществ, при реакции озона с содержащимися в воде соединениями хлора и органическими веществами [6, 14].

Озонирование зерна является рентабельной технологией, приносящей существенную экономическую выгоду за счет уменьшения порчи зерна и продуктов его переработки патогенными микроорганизмами и насекомыми [8]. Применение озона позволяет снизить потери зерна во время хранения на 10–15 %, на столько же увеличив прибыль предприятия [14]. Использование озона может быть выгодным благодаря более низким затратам на единоразовое приобретение и обслуживание установок для озонирования по сравнению с регулярными затратами на приобретение дезинфицирующих средств, в том числе хлорсодержащих, а также расходами на меры безопасности при работе с ними [8, 77].

Одним из главных достоинств применения газообразного озона является отсутствие образования опасных химических веществ в результате его применения [4]. В этом состоит его принципиальное отличие от химических средств дезинфекции, например, хлор, который требуется удалять из продукта по завершении обработки [14].

К недостаткам озонирования следует отнести высокую стоимость оборудования для получения озона [6]. Для более широкого использования в зерновом производстве нужно снизить себестоимость. Из-за высокой окислительной способности озона его следует с осторожностью применять при обработке зерна и зерновых продуктов, хранящихся в стальных емкостях, из-за риска их быстрой коррозии [12]. Недостатком применения газообразного озона является необходимость размещения обрабатываемого продукта достаточно тонким слоем, чтобы обеспечить его проницаемость для газа [50]. Необходимо учитывать явление адсорбции (поглощения) озона зерном, что требует усилий по поддержанию требуемой концентрации газа [50, 78].

Недостатком применения озона в зерновом производстве является сложность подбора его концентрации и продолжительности действия, одинаково эффективно действующих как на различные виды и стадии развития насекомых и микроорганизмов, так и на микотоксины и пестициды [6]. Проблема решается максимальным увеличением концентрации озона и времени обработки, но при этом возникает риск ухудшения качества зерна и муки.

Представленные недостатки не могут нивелировать достоинства применения озонирования в хранении и переработке зерна и вполне преодолимы.

Выводы

Анализ научных статей показал, что озонирование может найти широкое применение в хранении и переработке зерна в качестве «зеленой» технологии, обеспечивающей обеззараживание и детоксикацию сырья и готовой продукции без вреда для здоровья человека и животных, а также увеличение продолжительности их хранения. Благодаря этому озонирование является перспективной технологией для применения в сельском хозяйстве, пищевой и комбикормовой промышленности (рис. 3).

Но чтобы обеспечить широкое применение технологии обработки зерна и зернопродуктов озоном, необходимы дополнительные исследования, направленные на выявление рациональных параметров этого процесса применительно к конкретным объектам воздействия. В результате этих исследований необходимо установить значения концентрации озона, продолжительности обработки и других параметров, при которых происходит наиболее эффективное воздействие на конкретные виды патогенных микроорганизмов, насекомых-вредителей на различных стадиях развития, микотоксины и пестициды. Необходимо для каждого наименования зерна и зерновых продуктов подобрать параметры обработки озоном, не оказывающие вредного влияния на их качество.

Сдерживающим фактором для применения озона в переработке и хранении зерна является то, что большинство исследований, результаты которых рассмотрены в данном обзоре, были выполнены в лабораторных условиях и для практического применения на крупных промышленных и сельскохозяйственных предприятиях должны быть масштабированы.

Рисунок 3. Применение озона в переработке и хранении зерна

Figure 3. Ozonation in grain processing and storage

В результате экспериментальных исследований было доказано, что озон обладает антимикробным, фунгицидным, инсектицидным и деградирующим микотоксины и пестициды действием. Эффективность озона при уничтожении патогенных микроорганизмов составляет 60–90 %, насекомых-вредителей 70–100 %, при деградации микотоксинов 50–70 %, а остатков пестицидов 70–92 %. В результате уничтожения патогенных микроорганизмов и насекомых-вредителей значительно увеличивается срок хранения зерна и продуктов его переработки. Разрушение озоном вторичных токсичных веществ, содержащихся в зерне, а именно микотоксинов и остатков пестицидов, делает его полностью безопасным для животных и человека. Озон не снижает качества зерна и хлебопродуктов, быстро распадается и не образует токсичных соединений.

На эффективность обработки озоном влияют многие факторы: влажность сырья, концентрация озона, длительность обработки, pH и температура среды, форма применения (газ или водный раствор) и некоторые другие. Конечному пользователю бывает сложно подобрать параметры озонирования, одинаково эффективные против различных видов патогенных организмов и токсичных химических веществ. Поэтому существует необходимость в стандартизации выполнения процесса озонирования зерна и зернопродуктов с целью упрощения подбора рациональных параметров для конечного пользователя.

Результаты некоторых исследований показывают положительное влияние озонирования на качество пшеничной муки и производимых из нее хлебопродуктов, но требуется дополнительное изучение этого эффекта для установления рациональных параметров его применения.

Озонирование зерна и продуктов его переработки является рентабельной технологией, обеспечивающую экономическую выгоду, обусловленную уве-

личением сроков хранения и уменьшением порчи зерна и зернопродуктов.

Помимо перечисленных выше достоинств, озонирование имеет и недостатки, которые вполне преодолимы.

Таким образом, озонирование обладает высоким потенциалом для применения в хранении и переработке зерна.

Критерии авторства

А. В. Брагинец – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста статьи. О. Н. Бахчевников – формулирование основной концепции исследования, критический анализ первоначального варианта текста.

Конфликт интересов

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Contribution

A.V. Braginets reviewed scientific literature, drafted the manuscript, and proofread the final version. O.N. Bakhchevnikov developed the research concept, supervised the research, and edited the draft.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

Acknowledgement

The authors thank the reviewers for the peer review of this work.

References/Список литературы

1. Pandiselvam R, Kothakota A. Recent applications of ozone in agri-food industry. Ozone: Science and Engineering. 2022;44(1):1–2. https://doi.org/10.1080/01919512.2022.2018897

2. Islam F, Imran A, Khalid MA, Afzaal M, Fatima M, Chauhan A, *et al.* Green energy process “Ozonation” and food safety: a comprehensive review. Current Research in Nutrition and Food Science Journal. 2023;11(2):488–503. https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.2.03

3. Sun Y. Environmental regulation, agricultural green technology innovation, and agricultural green total factor productivity. Frontiers in Environmental Science. 2022;10:955954. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.955954

4. Wang Y, Qiao XJ, Wang Z. Application of ozone treatment in agriculture and food industry. A review. INMATEH-Agricultural Engineering. 2022;68(3):861–872. https://doi.org/10.35633/inmateh-68-86

5. Remondino M, Valdenassi L. Different uses of ozone: environmental and corporate sustainability. Literature review and case study. Sustainability. 2018;10(12):4783. https://doi.org/10.3390/su10124783

6. Brodowska AJ, Nowak A, Śmigielski K. Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2018;58(13):2176–2201. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1308313

7. Burak L. Using ozonizing technology in the food industry. Sciences of Europe. 2022;98:85–100. (In Russ.). https://doi.org/10.5281/zenodo.6973824; https://www.elibrary.ru/IORPDE

8. Sivaranjani S, Prasath VA, Pandiselvam R, Kothakota A, Khaneghah AM. Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. LWT. 2021;146:111412. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111412

9. Pandiselvam R, Thirupathi V, Mohan S, Vennila P, Uma D, Shahir S, *et al.* Gaseous ozone: A potent pest management strategy to control *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae) infesting green gram. Journal of Applied Entomology. 2019;143(4):451–459. https://doi.org/10.1111/jen.12618

10. Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research. 2019;104:333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

11. Torraco RJ. Writing integrative reviews of the literature: Methods and purposes. International Journal of Adult Vocational Education and Technology. 2016;7(3):62–70. https://doi.org/10.4018/IJAVET.2016070106

12. Pandiselvam R, Sunoj S, Manikantan MR, Kothakota A, Hebbar KB. Application and kinetics of ozone in food preservation. Ozone: Science and Engineering. 2017;39(2):115–126. https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1268947

13. Xue W, Macleod J, Blaxland J. The use of ozone technology to control microorganism growth, enhance food safety and extend shelf life: a promising food decontamination technology. Foods. 2023;12(4):814. https://doi.org/10.3390/foods12040814

14. Afsah-Hejri L, Hajeb P, Ehsani RJ. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020;19(4):1777–1808. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12594

15. Deng LZ, Tao Y, Mujumdar AS, Pan Z, Chen C, Yang XH, *et al.* Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods. Trends in Food Science and Technology. 2020;106:104–112. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.012

16. Burak L, Sapach A. Ozone technology as a method for storing food. The Scientific Heritage. 2022;86:21–33. (In Russ.). [Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Озоновая технология как способ сохранения пищевых продуктов // The Scientific Heritage. 2022. Т. 86. С. 21–33.]. https://www.elibrary.ru/LQCSOJ

17. Priorov IE, Nemtsov AS. Treatment of seeds and feed with ozone. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2020;4:186–190. (In Russ.). [Припоров И. Е., Немцов А. С. Обработка семян и кормов озоном // известия оренбургского государственного аграрного университета. 2020. Т. 4. С. 186–190.]. https://www.elibrary.ru/DVHPOQ

18. Rangel K, Cabral FO, Lechuga GC, Carvalho JPRS, Villas-Bôas MHS, Midlej V, *et al.* Detrimental effect of ozone on pathogenic bacteria. Microorganisms. 2021;10(1):40. https://doi.org/10.3390/microorganisms10010040

19. Savi GD, Scussel VM. Effects of Ozone Gas Exposure on Toxigenic Fungi Species from *Fusarium*, *Aspergillus*, and *Penicillium Genera*. Ozone: Science and Engineering. 2014;36(2):144–152. https://doi.org/10.1080/01919512.2013.846824

20. Levinskaite L, Vaicekauskyte V. Control of fungi isolated from cereals: Variations in the susceptibility of fungal species to essential oils, ozone, and UV-C. International Journal of Food Science and Technology. 2022;57(10):6389–6398. https://doi.org/10.1111/ijfs.15944

21. Beber-Rodrigues M, Savi GD, Scussel VM. Ozone effect on fungi proliferation and genera susceptibility of treated stored dry paddy rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Food Safety. 2015;35(1):59–65. https://doi.org/10.1111/jfs.12144

22. de Romero AC, de Morais JBA, Augusto PED, Calori-Domingues MA. Ozonation of agri-food products for reducing mycotoxin contamination: challenges in grains and particulates processing. Journal of Environmental Science and Health: Part B. 2021;56(9):845–851. https://doi.org/10.1080/03601234.2021.1962168

23. Pandiselvam R, Thirupathi V, Anandakumar S. Reaction kinetics of ozone gas in paddy grains. Journal of Food Process Engineering. 2015;38(6):594–600. https://doi.org/10.1111/jfpe.12189

24. Guo Y, Zhao L, Ma Q, Ji C. Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: A review. Food Research International. 2021;140:109878. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109878

25. Mir SA, Dar BN, Shah MA, Sofi SA, Hamdani AM, Oliveira CA, *et al.* Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: Challenges, and perspectives. Food and Chemical Toxicology. 2021;148: 111976. https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.111976

26. Jalili M. A review on aflatoxins reduction in food. Iranian Journal of Health, Safety and Environment. 2016;3(1):445–459. http://ijhse.ir/index.php/IJHSE/article/view/136

27. Porto YD, Trombete FM, Freitas-Silva O, de Castro IM, Direito GM, *et al.* Gaseous ozonation to reduce aflatoxins levels and microbial contamination in corn grits. Microorganisms. 2019;7(8):220. https://doi.org/10.3390/microorganisms7080220

28. Trombete FM, Freitas-Silva O, Saldanha T, Venâncio AA, Fraga ME. Ozone against mycotoxins and pesticide residues in food: Current applications and perspectives. International Food Research Journal. 2016;23(6):2545–2556. https://core.ac.uk/download/pdf/76178005.pdf

29. Pankaj SK, Shi H, Keener KM. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food. Trends in Food Science and Technology. 2018;71:73–83. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.007

30. Wang L, Luo Y, Luo X, Wang R, Li Y, Li Y, *et al.* Effect of deoxynivalenol detoxification by ozone treatment in wheat grains. Food Control. 2016;66:137–144. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.038

31. Alexandre APS, Vela-Paredes RS, Santos AS, Costa NS, Canniatti-Brazaca SG, Calori-Domingues MA, *et al.* Ozone treatment to reduce deoxynivalenol (DON) and zearalenone (ZEN) contamination in wheat bran and its impact on nutritional quality. Food Additives and Contaminants: Part A. 2018;35(6):1189–1199. https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1432899

32. Zhuang K, Zhang C, Zhang W, Xu W, Tao Q, Wang G, *et al.* Effect of different ozone treatments on the degradation of deoxynivalenol and flour quality in *Fusarium*-contaminated wheat. CyTA-Journal of Food. 2020;18(1):776–784. https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1849406

33. Krstović S, Krulj J, Jakšić S, Bočarov-Stančić A, Jajić I. Ozone as decontaminating agent for ground corn containing deoxynivalenol, zearalenone, and ochratoxin A. Cereal Chemistry. 2021;98(1):135–143. https://doi.org/10.1002/cche.10289

34. Shuai C, Li L, Yanhui H, Jin W, Zilong L, Xiaoxue S, J *et al.* Study on the degradation of deoxynivalenol in corn and wheat both in the lab and barn by low concentration ozone. Journal of Food Processing and Preservation. 2021;46(10):e15833. https://doi.org/10.1111/jfpp.15833

35. Purar B, Djalovic I, Bekavac G, Grahovac N, Krstović S, Latković D, *et al*. Changes in *Fusarium* and *Aspergillus* mycotoxin content and fatty acid composition after the application of ozone in different maize hybrids. Foods. 2022;11(18):2877. https://doi.org/10.3390/foods11182877

36. Zhao L, Qi D, Ma Q. Novel strategies for the biodegradation and detoxification of mycotoxins in post-harvest grain. Toxins. 2023;15(7):445. https://doi.org/10.3390/toxins15070445

37. Qi L, Li Y, Luo X, Wang R, Zheng R, Wang L, et al. Detoxification of zearalenone and ochratoxin A by ozone and quality evaluation of ozonised corn. Food Additives and Contaminants: Part A. 2016;33(11):1700–1710. https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1232863

38. Conte G, Fontanelli M, Galli F, Cotrozzi L, Pagni L, Pellegrini E. Mycotoxins in feed and food and the role of ozone in their detoxification and degradation: An update. Toxins. 2020;12(8):486. https://doi.org/10.3390/toxins12080486

39. Wang S, Wang J, Wang T, Li C, Wu Z. Effects of ozone treatment on pesticide residues in food: a review. International Journal of Food Science and Technology. 2019;54(2):301–312. https://doi.org/10.1111/ijfs.13938

40. Aidoo OF, Osei-Owusu J, Chia SY, Dofuor AK, Antwi-Agyakwa AK, Okyere H, *et al.* Remediation of pesticide residues using ozone: A comprehensive overview. Science of The Total Environment. 2023;894:164933. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164933

41. Pandiselvam R, Kaavya R, Jayanath Y, Veenuttranon K, Lueprasitsakul P, Divya V, *et al.* Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods–a review. Trends in Food Science and Technology. 2020;97:38–54. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.017

42. Vijay Rakesh Reddy S, Sudhakar Rao DV, Sharma RR, Preethi P, Pandiselvam R. Role of ozone in post-harvest disinfection and processing of horticultural crops: A review. Ozone: Science and Engineering. 2022;44(1):127–146. https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1994367

43. de Avila MBR, Faroni LRA, Heleno FF, de Queiroz MEL, Costa LP. Ozone as degradation agent of pesticide residues in stored rice grains. Journal of Food Science and Technology. 2017;54(12):4092–4099. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2884-1

44. de Freitas RDS, Faroni LRDA, de Queiroz MELR, Heleno FF, Prates LHF. Degradation kinetics of pirimiphos-methyl residues in maize grains exposed to ozone gas. Journal of Stored Products Research. 2017;74:1–5. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.08.008

45. Savi GD, Piacentini KC, Scussel VM. Reduction in residues of deltamethrin and fenitrothion on stored wheat grains by ozone gas. Journal of Stored Products Research. 2015;61:65–69. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.12.002

46. Savi GD, Piacentini KC, Bortolotto T, Scussel VM. Degradation of bifenthrin and pirimiphos-methyl residues in stored wheat grains (*Triticum aestivum* L.) by ozonation. Food Chemistry. 2016;203:246–251. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.069

47. Kaur K, Kaur P, Kumar S, Zalpouri R, Singh M. Ozonation as a potential approach for pesticide and microbial detoxification of food grains with a focus on nutritional and functional quality. Food Reviews International. 2022;39(9)1–33. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2092129

48. Rehal J, Kaur J, Samandeep, Diksha A. Removal of pesticide residues in food using ozone. Food Chemistry Advances. 2023;3:100512. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100512

49. Boopathy B, Rajan A, Radhakrishnan M. Ozone: an alternative fumigant in controlling the stored product insects and pests: a status report. Ozone: Science and Engineering. 2022;44(1):79–95. https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1933899

50. Isikber AA, Athanassiou CG. The use of ozone gas for the control of insects and micro-organisms in stored products. Journal of Stored Products Research. 2015;64:139–145. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.06.006

51. de Sousa IG, Oliveira J, Mexia A, Barros G, Almeida C, Brazinha C, *et al.* Advances in environmentally friendly techniques and circular economy approaches for insect infestation management in stored rice grains. Foods. 2023;12(3):511. https://doi.org/10.3390/foods12030511

52. Dong X, Agarwal M, Xiao Y, Ren Y, Maker G, Yu X. Ozone efficiency on two coleopteran insect pests and its effect on quality and germination of barley. Insects. 2022;13(4):318. https://doi.org/10.3390/insects13040318

53. Baskakov IV. Grain ozonous treatment and its influence on stored-grain pests and insects. Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2019;12(3):41–46. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.3.41; https://www.elibrary.ru/JVSZIP

54. Baskakov IV, Orobinsky VI, Vasilenko VV, Gievsky AM. Ozone disinfection of grain from granary weevil and confused flour beetle. Siberian Herald of Agricultural Science. 2022;52(5):42–48. (In Russ.). https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-5-5; https://www.elibrary.ru/TMCLGR

55. Ingegno BL, Tavella L. Ozone gas treatment against three main pests of stored products by combination of different application parameters. Journal of Stored Products Research. 2022;95:101902. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101902

56. Srivastava S, Mishra G, Mishra HN. Vulnerability of different life stages of *Sitophilus oryzae* insects in stored rice grain to ozone treatment and its effect on physico-chemical properties in rice grain. Food Frontiers. 2021;2(4):494–507. https://doi.org/10.1002/fft2.89

57. Abdelfattah NA, Marie AM, Fawki S. The Effect of Ozone on Rhyzopertha dominica, Tribolium Castaneum, and Technological Properties of Wheat Flour. Ozone: Science and Engineering. 2023;45(9)1–15. https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2171363

58. Hansen LS, Hansen P, Jensen KMV. Effect of gaseous ozone for control of stored product pests at low and high temperature. Journal of Stored Products Research. 2013;54:59–63. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.05.003

59. Ramos GYR, Silva GN, Silva YNM, Silva YDM, Marques IS, da Silva GL, *et al.* Ozonation of cowpea grains: alternative for the control of *Callosobruchus maculatus* and maintenance of grain quality. Agriculture. 2023;13(5):1052. https://doi.org/10.3390/agriculture13051052

60. Baskakov IV, Orobinsky VI, Gievsky AM, Gulevsky VA, Chernyshov AV. Ozone pest control of grain. Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023;1138(1):012026. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1138/1/012026

61. Sunisha K. Ozone fumigation in stored paddy: Changes in moisture content upon storage. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2019;7(3):1137–1140. https://www.entomoljournal.com/archives/2019/vol7issue3/PartS/7-2-83-452.pdf

62. Kiryukhina AN, Grigoreva RZ, Kozhevnikova AYu. Bread Production and Bakery Products in Russia: Current State and Prospects. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(2):330–337. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-330-337; https://www.elibrary.ru/XDTXYZ

63. Sharma R, Singh A, Sharma S. Influence of ozonation on cereal flour functionality and dough characteristics: a review. Ozone: Science and Engineering. 2021; 43(6):613–636. https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1898337

64. Li MM, Guan EQ, Bian K. Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and quality evaluation of ozonised wheat. Food Additives and Contaminants: Part A. 2015;32(4):544–553. https://doi.org/10.1080/19440049.2014.976596

65. Dubois M, Coste C, Despres AG, Efstathiou T, Nio C, Dumont E, *et al.* Safety of Oxygreen®, an ozone treatment on wheat grains. Part 2. Is there a substantial equivalence between Oxygreen-treated wheat grains and untreated wheat grains? Food Additives and Contaminants. 2006;23:1–15. https://doi.org/10.1080/02652030500316728

66. Ding W, Wang Y, Zhang W, Shi YC, Wang D. Effect of ozone treatment on physicochemical properties of waxy rice flour and waxy rice starch. International Journal of Food Science and Technology. 2015;50(3):744–749. https://doi.org/10.1111/ijfs.12691

67. Li M, Zhu KX, Wang BW, Guo XN, Peng W, Zhou HM. Evaluation of the quality characteristics of wheat flour and shelf-life of fresh noodles as affected by ozone treatment. Food Chemistry. 2012;135(4):2163–2169. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.103

68. Valieva AI, Akulov AN, Rumyantseva NI. Phenolic compounds in purple whole-wheat flour and bread: Comparative analysis. Foods and Raw Materials. 2024;12(2):334–347. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-611; https://www.elibrary.ru/OJJZLQ

69. Zhu F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. Food Chemistry. 2018;264:358–366. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047

70. Baskakov IV, Orobinsky VI, Gievsky AM, Chernyshov AV, Chernova OV. The influence of the ozonation process on the quality indicators of winter wheat grain. Storage and Processing of Farm Products. 2023;(1):177–189. (In Russ.). https://doi.org/10.36107/spfp.2023.396; https://www.elibrary.ru/FTYMLS

71. Mei J, Liu G, Huang X, Ding W. Effects of ozone treatment on medium-hard wheat (*Triticum aestivum* L.) flour quality and performance in steamed bread making. CyTA-Journal of Food. 2016;14(3):449–456. https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1133714

72. Lee MJ, Kim MJ, Kwak HS, Lim ST, Kim SS. Effects of ozone treatment on physicochemical properties of Korean wheat flour. Food Science and Biotechnology. 2017;26(2):435–440. https://doi.org/10.1007/s10068-017-0059-5; https://www.elibrary.ru/FYPWQQ

73. Obadi M, Zhu KX., Peng W, Sulieman AA, Mohammed K, Zhou HM. Effects of ozone treatment on the physico-chemical and functional properties of whole-grain flour. Journal of Cereal Science. 2018;81:127–132. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.008

74. Li M, Peng J, Zhu KX, Guo XN, Zhang M, Peng W, *et al.* Delineating the microbial and physical-chemical changes during storage of ozone-treated wheat flour. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2013;20:223–229. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.06.004

75. Sandhu HP, Manthey FA, Simsek S. Quality of bread made from ozonated wheat (*Triticum aestivum* L.) flour. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2011;91(9):1576–1584. https://doi.org/10.1002/jsfa.4350

76. Chittrakorn S, Earls D, MacRitchie F. Ozonation as an alternative to chlorination for soft wheat flours. Journal of Cereal Science. 2014;60(1):217–221. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.02.013

77. Glowacz M, Colgan R, Rees D. The use of ozone to extend the shelf-life and maintain quality of fresh produce. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2014;95(4):662–671. https://doi.org/10.1002/jsfa.6776

78. Tiwari BK, Brennan CS, Curran T, Gallagher E, Cullen PJ, O'Donnell CP. Application of ozone in grain processing. Journal of Cereal Science. 2010;51(3):248–255. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007