DOI 10.33952/2542-0720-2021-2-26-41-61
УДК 636.085.65;664.727

Бахчевников О. Н., Брагинец А. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ОЗОНА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ КОРМОВОГО СЫРЬЯ (ОБЗОР)

ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»

Реферат. *В обзоре рассмотрены вопросы обеззараживания сырья для производства кормов методом озонирования. Озонирование сырья может стать универсальным методом его обеззараживания в сельхозпредприятиях и комбикормовых заводах. Целью исследований является обобщение и анализ научных публикаций, посвященных обеззараживанию кормового сырья действием озона, уточнение информации о рациональных параметрах его осуществления и влиянии на качество кормов для оценки возможности дальнейшего использования на производствах. Выполнены поиск, отбор и систематический обзор цитируемых иностранных научных статей по теме исследования за период 2005–2020 гг. Озонирование является эффективным средством для деконтаминации кормов, позволяющим уничтожать патогенные бактерии и грибы, его используют для детоксикации кормов и борьбы с насекомыми-вредителями. Метод озонирования с целью обеспечения биологической безопасности кормового сырья еще не нашел широкого применения в сельскохозяйственном производстве и комбикормовой промышленности. Чтобы обеспечить его более широкое применение, необходимо провести дополнительные исследования, направленные на повышение эффективности озонирования путем стандартизации параметров его осуществления. Разработка технических решений, улучшающих диффузию газообразного озона в массе сырья, значительного повысит его безопасность и сохранность. Необходимо определить рациональные значения концентрации озона, продолжительности обработки и сопутствующих параметров для каждого вида сырья и каждого вида поражающих его микроорганизмов, насекомых, включая различные стадии их развития, а также микотоксинов и пестицидов, обратив особенное внимание на изучение комплексной эффективности озонирования в отношении нескольких патогенных факторов.*

Ключевые слова*: корма, сырье, озон, озонирование, обеззараживание, детоксикация, микотоксины, деконтаминация, дезинсекция.*

Для цитирования: *Бахчевников О. Н., Брагинец А. В. Применение озона для обеззараживания кормового сырья (обзор) // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2(26). С. 41–61. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-41-61.*

For citation: *Bakhchevnikov O. N., Braginets A. V. Ozonation for feed raw materials disinfection (review) // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 2(26). P. 41–61. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-41-61.*

Введение

В настоящее время существует проблема биологической безопасности сырья для приготовления кормов. Растительное сырье в период сбора урожая, транспортировки и хранения массово поражается микроскопическими грибами родов *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Fusarium* и др. [1, 2]. Эти грибы в процессе жизнедеятельности выделяют вредные для животных и человека вещества – микотоксины [3], в том числе афлатоксины, охратоксин А, зеараленон, дезоксиниваленол и др. [4–6]. Поэтому перед производителями стоит задача

обеспечения безопасности сырья и кормов путем разрушения микотоксинов и уничтожения микроскопических грибов [7, 8].

Сырье растительного и животного происхождения поражается различными болезнетворными бактериями, в частности представителями родов *Salmonella, Staphylococcus,* видом *Escherichia coli,* что также создает необходимость его обеззараживания [9, 10].

В сельском хозяйстве для защиты растений широко используют различные пестициды. Но многие из них являются стойкими органическими загрязнителями, то есть обладают высокой токсичностью для животных и устойчивы к разрушению в естественных условиях, способны накапливаться в тканях живых организмов [11]. Поэтому их детоксикация является не менее важной, чем разрушение микотоксинов [12].

Необходимой мерой является уничтожение амбарных вредителей – насекомых, повреждающих зерно во время хранения [13].

Проблема биологической безопасности кормового сырья решается путем использования различных методов.

Для детоксикации сырья используют методы, подразделяемые на физические (механическая очистка, нагревание, действие различных излучений), химические (обработка веществами, вступающими в химические реакции с токсинами), биологические и сорбционные (с использованием связывающих агентов) [8, 14].

Для уничтожения патогенных грибов, микроорганизмов и насекомых-вредителей также используют различные физические и химические методы [15].

Следует отметить, что как для разрушения конкретных токсинов, так и для уничтожения определенных патогенных организмов необходимо применять различные методы. Поэтому оптимальным является использование для подготовки кормов комбинаций различных физических и химических методов, что усложняет и удорожает технологический процесс [8, 15]. Но для сельхозпредприятий и комбикормовых заводов рационально использовать для этих целей один универсальный метод. Анализ научных публикаций показал, что таким методом может стать озонирование сырья, то есть его обработка газообразным (озоно-воздушная смесь) или растворенным в воде озоном [16–18]. Для успешного использования этого метода необходимо учесть последние научные данные, в том числе полученные зарубежными исследователями. Это обусловило необходимость проведения систематического обзора и критического анализа научных публикаций, посвященных применению озона для обеззараживания кормового сырья.

Озон (O_3) – это газ, являющийся аллотропной трехатомной модификацией кислорода [16]. В отличие от кислорода, молекулы озона нестабильны, что затрудняет его промышленное применение. Стабильность газа O_3 зависит от давления и температуры окружающей среды [19]. Озон в форме водного раствора гораздо менее стоек, чем газообразный [19, 20], его стабильность при этом зависит от температуры и pH жидкости [18, 19].

Основным методом получения озона является пропускание через кислород коронного электрического разряда [18, 21]. Водный раствор озона получают, пропуская его через жидкость методом барботирования или эжектирования [22].

При обработке сырья озоном его применяют в газообразной форме (озоно-воздушная смесь), помещая продукт в атмосферу, насыщенную газом, либо растворяют в воде, в которую затем погружают сырье [18].

Действие озона основано на его высокой окислительной способности, превосходящей действие других веществ-окислителей, применяемых в комбикормовой и пищевой промышленности [23]. Помимо этого, распад озона в воде происходит с образованием свободных радикалов, также обладающих высокой

окислительной способностью [16, 24]. Озон вступает в химические реакции с токсинами, нейтрализуя их, а также взаимодействует с веществами, входящими в состав клеток патогенных организмов, нарушая их жизнедеятельность [18, 23].

Цель исследований – обобщение и анализ научных публикаций, посвященных обеззараживанию кормового сырья с применением озона, для получения информации о рациональных параметрах его осуществления и влиянии на качество кормов для сельскохозяйственных животных для оценки возможности дальнейшего использования на производствах.

Для выполнения поставленной цели сформулирована задача: на основе обзора результатов ранее выполненных исследований определить эффективность использования озона для:

– деградации микотоксинов в кормовом сырье и установить рациональные условия и приемы его осуществления;

– разрушения пестицидов в кормовом сырье и установить рациональные условия и приемы его осуществления;

– деконтаминации кормов и выявить повышающие ее факторы;

– уничтожения насекомых вредителей и условия его осуществления.

Также необходимо определить способы практического осуществления озонирования сырья, в том числе при воздействии на его слой значительной глубины; выявить достоинства и недостатки озонирования как метода обеззараживания кормового сырья.

Материалы и методы исследования

Отбор и систематический обзор иностранной научной литературы по теме исследования выполнен по методике, изложенной в работах R. J. Torraco [25] и C. Okoli [26].

Для выбора научных статей на английском языке провели поиск по приведенным ниже ключевым словам в библиографических базах «Google Scholar» и «Scopus». Для отбора научных статей на русском языке провели поиск по ключевым словам в «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». Также выполнили обзор научных журналов по тематике исследования. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам. Были просмотрены списки литературы отобранных статей для выявления дополнительных релевантных источников информации.

Поиск публикаций осуществляли по следующим ключевым словам и их комбинациям: корма (feed), озон (ozone), озонирование (ozonation), деконтаминация (decontamination), детоксикация (detoxification), микотоксины (mycotoxins), пестициды (pesticides), насекомые-вредители (insects pest), безопасность кормов (feed safety).

В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2005–2020 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по конкретным аспектам исследуемой темы.

Результаты и их обсуждение

Механизм действия озона на микотоксины основан на том, что он как окислитель вступает в реакцию с функциональными группами в их молекулах, изменяя молекулярную структуру, что приводит к образованию продуктов с меньшей молекулярной массой, меньшим количеством двойных связей и меньшей токсичностью [27].

Наиболее изучен механизм действия озона на афлатоксины, в частности на афлатоксин B_1 [28]. Озон воздействует на фурановое кольцо в молекуле афлатоксина, что приводит к образованию промежуточных комплексов (озонидов), конечными продуктами распада которых являются органические кислоты, кетоны и

альдегиды [29].

Результаты экспериментов показывают высокую эффективность озонирования для редукции афлатоксинов [28, 29]. При этом его эффективность зависит от влажности сырья. X. Luo и соавторы установили, что после обработки зерна влажностью 13,5 % содержание афлатоксина B_1 снизилось на 88,1 %, а после обработки зерна влажностью 20,4 % – на 72,4 % (концентрация озона 90 мг/л в течение 40 мин) [30].

В последние годы опубликованы многочисленные статьи, посвященные эффективности озонирования различных видов сырья для редукции содержащихся в нем микотоксинов [17]. Некоторые результаты исследований приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, существует большая вариация в применяемых концентрациях озона и продолжительности обработки. Но результаты исследований показывают высокую эффективность обработки сырья газообразным озоном, хотя на их основе сложно сделать заключение о рациональных параметрах озонирования. При этом исследователи согласны в том, что обработка сырья водным раствором озона менее эффективна [17, 18].

Таблица 1 – Результаты исследований по редукции микотоксинов методом озонирования

Исследователь	Вид сырья	Продолжи-тельность озонирования, мин	Концентрация и форма озона	Микотоксин	Уменьшение содержания микотоксина, %
Trombete F. M. et al., 2016 [31]	Зерно пшеницы	300	60 г/м^3 (газ)	Афлатоксины	64
				Дезоксиниваленол	48
Torlak E. et al., 2016 [32]	Комбикорм для птиц	240	2,8 г/м^3 (газ)	Афлатоксин B_1	74
			5,3 г/м^3 (газ)		86
Kouchesfahani M. M. et al., 2015 [33]	Зерно пшеницы	180	2,5 г/м^3 (водный раствор)	Афлатоксин B_1	34
Alexandre A. P. S. et al., 2018 [34]	Пшеничные отруби	15	62 г/м^3 (газ)	Дезоксиниваленол	29
				Зеараленон	57
Alexandre A. P. S. et al., 2019 [35]	Измельченная кукуруза	10	52 г/м^3 (газ)	Зеараленон	56
Porto Y. D. et al., 2019 [36]	Измельченная кукуруза	480	60 г/м^3 (газ)	Афлатоксин B_1	55

Однако результаты некоторых исследований продемонстрировали и отрицательные эффекты озонирования. Так, Y. Wang сообщает, что озонирование зерна привело к уменьшению содержания афлатоксина B_1 на 92 %, но при этом содержание протеина снизилось на 3,2 % [37]. По сообщению A. D. Prudente Jr., озон отрицательно воздействует на профиль жирных кислот зерна [38].

Существенный недостаток проведенных исследований – отсутствие анализа наличия в сырье продуктов распада микотоксинов после озонирования и их потенциальной опасности для животных и человека [17]. Например, B. A. Temba сообщает о наличии в продукте, подвергнутом озонированию, токсичных веществ [39]. Поэтому для обеспечения возможности промышленного применения озонирования необходимо установить концентрации озона, безопасные с точки

зрения образования вредных продуктов распада микотоксинов.

Важной проблемой является также то, что большинство публикаций излагают результаты исследований, в которых использовали лабораторное оборудование и малое количество сырья. Очевидно, что необходимо их масштабирование для применения на промышленных предприятиях с высокой производительностью и непрерывным потоком сырья, что требует проведения дополнительных исследований.

Большинство проанализированных исследований посвящено редукции конкретных микотоксинов, но практически нет статей, в которых была бы оценка совокупного воздействия озонирования на весь комплекс микотоксинов, содержащихся в сырье. Очевидно, что необходимо провести исследования, направленные на определение параметров озонирования, обеспечивающих одновременную удовлетворительную редукцию большинства распространенных микотоксинов.

Таким образом, для широкого внедрения озонирования в технологический процесс комбикормовых заводов с целью удаления из сырья микотоксинов необходимо проведение дополнительных исследований по определению рациональных параметров его осуществления.

Применение озона для разрушения пестицидов. Механизм действия озона на пестициды основан на том, что он как окислитель вступает с ними в химические реакции, частично или полностью преобразуя их в менее токсичные или нетоксичные вещества [11]. Действие газообразного и растворенного в воде озона является эффективным средством для разрушения пестицидов [40].

Опубликованные научные работы подтверждают эффективность озона при воздействии на содержащиеся в сельскохозяйственной продукции пестициды, но основная часть исследований посвящена детоксикации фруктов и овощей [12, 41], предназначенных в пищу человеку, хотя очевидно, что пестициды, содержащиеся в кормах, представляют опасность и для сельскохозяйственных животных.

Из зернового сырья наиболее исследован вопрос детоксикации зерен риса [42]. Для него также установлена высокая эффективность обработки газообразным озоном, приводящая к разрушению до 92 % пестицидов. Очевидна необходимость проведения подобных исследований и для фуражного зерна.

Некоторые результаты исследований по детоксикации загрязненного пестицидами сельскохозяйственного сырья приведены в таблице 2.

Анализируя результаты этих и других исследований, можно сделать вывод, что эффективность озонирования для удаления пестицидов зависит от концентрации озона, температуры окружающей среды и продолжительности воздействия и повышается при увеличении их значений [12]. При этом эффективность озонирования была более высокой для более загрязненных пестицидами образцов сырья. Большинство исследователей считают, что увеличение концентрации озона эффективно, однако ее нельзя увеличивать неограниченно, так как это может привести к ухудшению качества сырья.

Для пестицидов отсутствует объективная информация о большей эффективности воздействия на них газообразного или растворенного в воде озона [41]. В тоже время имеются сведения, свидетельствующие о большей эффективности действия газообразного озона на более влажное сырье. G. D. Savi сообщает о том, что при обработке газообразным озоном зерен пшеницы степень разрушения пестицида была более высокой для более влажного сырья [47]. Для пшеницы влажностью 12 % разрушение пестицидов составило 80,6 % против 88,2 % для зерна влажностью 20 %.

Таблица 2 – Результаты исследований по редукции пестицидов методом озонирования

Исследователь	Вид сырья	Продолжи-тельность озонирования, мин	Концентрация и форма озона	Пестицид	Уменьшение содержания пестицида, %
De Avila M. B. R. et al., 2017 [42]	Зерна риса	600	3 мг/л (газ – 1 л/мин)	Бифетрин	91,9
				Дельтаметрин	92,7
Jijun G. et al., 2011 [43]	Яблоки	20	16 мг/л (водный раствор)	Дифениламин	75,5
				Карбендазим	59,1
				Хлорофалонил	64,8
Whangchai K. et al., 2011 [44]	Шпинат	60	240 мг/л (газ)	Хлорпирифос	45
De Souza L. P. et al., 2018 [45]	Морковь	120	5 мг/л (газ)	Дифеконазол	95,3
Wu Y. et al., 2019 [46]	Шпинат	30	0,4 мг/л (водный раствор)	Хлорпирифос	53

Недостатком озонирования как метода удаления пестицидов является возможность образования в результате распада некоторых из них иных токсичных веществ [48].

Большинство исследований посвящено редукции конкретных пестицидов, но мало статей, оценивающих совокупное воздействие озонирования на весь их комплекс, содержащийся в сырье. Необходимы исследования, направленные на определение параметров озонирования, обеспечивающих одновременное удаление большинства распространенных пестицидов.

Таким образом, для широкого внедрения озонирования с целью удаления пестицидов необходимо проведение дополнительных исследований по определению рациональных параметров его осуществления.

Применение озона для деконтаминации кормов. Механизм действия озона на микроорганизмы (бактерии и грибы) основан на их инактивации прогрессивным окислением различных органелл клетки, включая клеточную мембрану [10]. При этом происходит разрушение клеточной оболочки в результате окисления ненасыщенных жирных кислот в ее составе, что приводит к лизису микроорганизмов [49]. Кроме этого, озон окисляет аминокислоты белков клетки, что приводит к ее гибели [15, 49].

Не все микроорганизмы в равной мере чувствительны к действию озона. Бактерии, особенно грамположительные, более подвержены действию озонирования, чем грибы [15]. В то же время бактериальные споры весьма устойчивы к действию озона [16].

Следует отметить, что эффективность действия озонирования на бактерии очень сильно разнится в зависимости от условий эксперимента, а именно концентрации озона, бактериальной обсемененности, вида микроорганизмов, температуры среды и др. Тем не менее, все исследователи согласны, что озонирование снижает содержание бактерий в сырье [15, 16].

Эффективность озонирования возрастает при увеличении концентрации озона и продолжительности его действия [15]. Так, по данным G. R. Finch увеличение концентрации газообразного озона с 4,4 до 800 мкг/л и продолжительности обработки с 30 до 120 с привело к снижению содержания кишечной палочки (*Escherichia coli*) в 13 раз [50].

Были проведены сравнительные исследования по обработке сырья

газообразным и водным раствором. B. Zorlugenc установил, что количество аэробных мезофильных микроорганизмов после обработки газообразным озоном снизилось на 51,5 %, а после погружения сырья (плоды инжира *Ficus carica* L.) в водный раствор озона – на 87,7 % [51]. Но при этом бактерии кишечной палочки были полностью дезактивированы после обработки в течение 7,5 мин обоими методами. L. Restaino также сообщает о большей эффективности водного раствора озона и быстром уничтожении в результате его применения грамотрицательных бактерий, включая *Salmonella typhimurium* [52].

Обработка фуражного зерна озоном является эффективным методом уничтожения патогенных грибов, в том числе наиболее распространенных родов *Aspergillus* и *Fusarium*. Но озонирование эффективно лишь для удаления грибов, содержащихся в поверхностных слоях зерна, и не затрагивает его ядро [53]. Многие ученые сообщают, что даже низкие концентрации озона при малой продолжительности обработки позволяют эффективно удалить споры и мицелий патогенных грибов с поверхности зерна [15]. По сообщению J. N. Wu, при обработке газообразным озоном зерен пшеницы в течение 5 мин с концентрацией 0,33 мг озона на 1 г зерна было уничтожено 96,9 % грибковых спор [54]. Однако по мнению некоторых исследователей, например, J. N. Wu и B. J. Allen, озон при более высокой концентрации может проникать и в центральную часть зерна, частично уничтожая патогенные микроорганизмы [54, 55]. Для фуражного зерна, в отличие от семенного, увеличение концентрации озона не представляет опасности. Действие озона также не приводит к значительному снижению его питательной ценности [56, 57].

Результаты экспериментов свидетельствуют, что увеличение температуры окружающей среды при постоянной концентрации озона повышает эффективность обработки против патогенных грибов [54]. Данные о влиянии влажности сырья на эффективность озонирования при деконтаминации противоречивы и не позволяют сделать однозначные выводы [15, 54, 58].

Таким образом, для широкого внедрения озонирования с целью деактивации патогенных микроорганизмов необходимо проведение дополнительных исследований по определению рациональных параметров его осуществления.

Озонирование как средство борьбы с насекомыми-вредителями. Озонирование является эффективным средством борьбы с насекомыми, поражающими кормовое сырье, особенно фуражное зерно, во время хранения. Эффективность действия газообразного озона на различных насекомых-вредителей составляет от 70 до 100 % [16].

Анализ публикаций показывает, что концентрация газообразного озона и особенно продолжительность обработки играют важную роль в эффективности его действия на насекомых. По данным C. G. Athanassiou, смертность взрослых насекомых видов долгоносик рисовый (*Sitophilus oryzae*) и зерновой бурильщик (*Rhyzopertha dominica*) после 2 ч обработки с концентрацией 115 ppm (миллионных долей) составила 60 %, а после 4 ч – 100 % [59]. В том же исследовании смертность насекомых вида хрущак малый (*Tribolium confusum*) после 2 ч обработки составила 30 %, а после 6 ч – 100 %.

Результаты исследований показывают, что продолжительность озонирования с целью уничтожения насекомых-вредителей должна быть достаточно большой – от двух до шести часов и гораздо более длительной, чем для уничтожения микроорганизмов и редукции микотоксинов [16]. При этом для полного уничтожения разных видов насекомых при озонировании требуется различная концентрация и продолжительность обработки.

M. X. McDonough разработал модель для вычисления необходимых для полного

уничтожения насекомых параметров озонирования на основе производной величины *CT*, равной произведению концентрации газообразного озона *C* и продолжительности обработки *T* [60]. Например, он показал, что для полного уничтожения взрослых насекомых вида хрущак малый (*Tribolium castaneum*) озоном требуется *CT* = 216000 ppm·мин, а для амбарной огневки (*Plodia interpunctella*) *CT* = 30000 ppm × мин. Таким образом, согласно этой модели, для полного уничтожения насекомых определенного вида необходимо достичь конкретной величины *CT*, изменяя параметры озонирования – концентрацию озона и продолжительность обработки.

Однако существуют различия в чувствительности к озону насекомых на разных стадиях развития (яйца, личинки, куколки, взрослые особи) [16]. Характеризующие эти различия данные исследования M. X. McDonough приведены в таблице 3 [60].

Таблица 3 – Величина *CT*, необходимая для полного уничтожения насекомых при озонировании (M. X. McDonough, 2011)

Вид насекомых	Стадия развития	*CT*, ppm·мин
Амбарная огневка (*Plodia interpunctella*)	Яйца	324000
	Личинки	162000
	Куколки	216000
	Взрослые особи	30000
Хрущак малый (*Tribolium castaneum*)	Яйца	324000
	Личинки	162000
	Куколки	324000
	Взрослые особи	216000

Результаты этого и других исследований показывают, что наиболее чувствительны к действию озона взрослые насекомые и их личинки, в то время как куколки и особенно яйца более устойчивы. Так, A. A. Isikber сообщает о том, что после обработки озоном в течение двух часов с концентрацией 13,9 мг/л было достигнуто полное уничтожение мельничной огневки (*Ephestia kuehniella*) в стадии взрослого насекомого, куколки и личинки, но одна треть ее яиц сохранила жизнеспособность [61]. Это объясняют тем, что озон проникает в организм насекомых через дыхательную систему, воздействуя в первую очередь на нее [62], поэтому пониженная дыхательная активность куколок и яиц способствует их большей устойчивости [63]. Также возможно, что плотный внешний слой на яйцах и куколках создает дополнительный барьер для проникновения озона [60]. Следовательно, если целью обработки является обеспечение длительной сохранности сырья, то концентрация газообразного озона и длительность его действия должны быть значительными и достаточными и для уничтожения яиц насекомых.

В отличие от случаев озонирования сырья с целью уничтожения бактерий и грибов, нет достоверных данных о влиянии на эффективность использования озона для борьбы с насекомыми температуры среды и влиянии на этот процесс влажности сырья.

Таким образом, использование газообразного озона эффективно для борьбы с насекомыми-вредителями сырья при условии достижения необходимой для удаления конкретного вида насекомых величины *CT* (концентрация × продолжительность обработки).

Способы практического осуществления озонирования сырья. При обработке потока поступающего на предприятие кормового сырья озон применяют в газообразной форме (озоно-воздушная смесь) или в виде водного раствора.

Линия поточной обработки сырья газообразным озоном состоит из емкостей с

кислородом или кислородного концентратора, генератора озона, камеры обработки, устройства для деструкции озона, а также компрессора, вентиляторов и др. (рисунок 1).

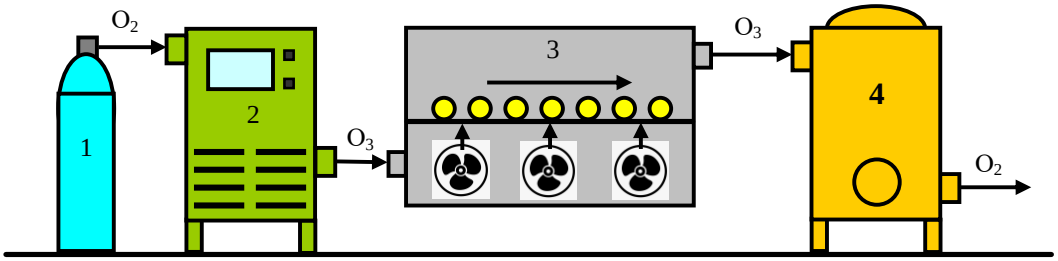

Рисунок 1 – Линия поточной обработки сырья газообразным озоном

Примечание. *1 – емкость с кислородом; 2 – озонатор; 3 – камера озонирования; 4 – деструктор озона.*

Для обработки хранящегося на складе зернового сырья такая схема озонирования не подходит, поэтому применяют технологическую схему, предусматривающую длительную подачу газообразного озона в силосы с зерном (рисунок 2).

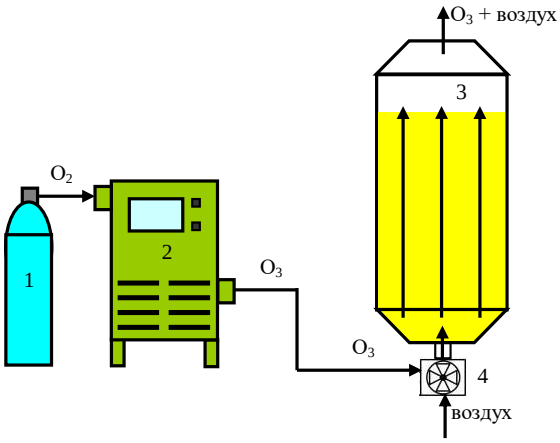

Рисунок 2 – Линия озонирования зернового сырья во время хранения

Примечание. *1 – емкость с кислородом; 2 – озонатор; 3 – силос с зерном; 4 – вентилятор.*

При обработке водным раствором озона сырье в камере обработки омывают жидкостью либо погружают в нее на определенное время (рисунок 3).

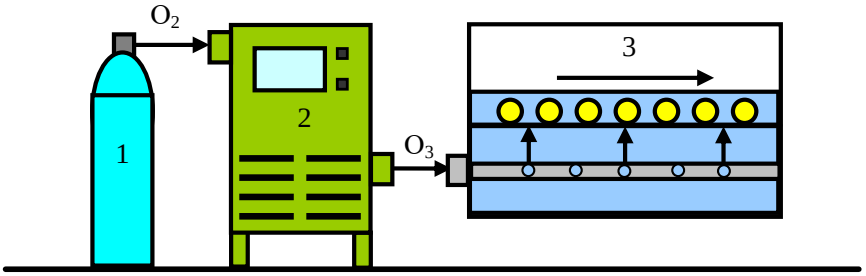

Рисунок 3 – Линия поточной обработки сырья водным раствором озона

Примечание. *1 – емкость с кислородом; 2 – озонатор; 3 – камера озонирования.*

Следует отметить, что стабильность озона в воде значительно зависит от ее чистоты, поэтому для приготовления его водного раствора необходимо производить предварительную очистку жидкости от солей и других примесей [12, 19].

При обработке сырья водным раствором озона важное значение для эффективности процесса имеет размер его пузырей [12]. Чем он меньше, тем более стабилен озон и постоянна его концентрация. По сообщению ученых, эффективность озонирования при наличии в жидкости микропузырей (диаметром менее 50 мкм) значительно повышается за счет увеличения интенсивности перемещения озона и его более активного контакта с поверхностью частиц сырья [64, 65].

Проблема проницаемости слоя сырья для действия озона. При озонировании большого количества сырья, которое невозможно разместить тонким слоем, возникает проблема его проницаемости для действия газообразного озона. Особенно остро этот вопрос стоит при озонировании зернового сырья во время хранения (см. рисунок 2).

Быстрое достижение необходимой концентрации газообразного озона в емкости с зерном затруднено не только из-за сложности его проникновения через массу зерна, но и тем, что он вступает в химические реакции с веществами в поверхностном слое зерен [62]. Кроме того, имеет место адсорбция (поглощение) озона зерном [56]. Поэтому в данном случае необходимо поддерживать концентрацию озона в емкости путем периодической или постоянной подачи в нее этого газа [16].

Адсорбция озона в слое зерна зависит от концентрации газа, интенсивности его потока, продолжительности воздействия, температуры, особенностей строения зерен, а также присутствия других органических веществ, входящих в состав насекомых и микроорганизмов [62]. A. Raila наблюдал более медленное проникновение озона между слоями зерна с более высоким загрязнением плесневыми грибами [66]. Влажность также играет важную роль во взаимодействии озона с зерном, увеличивая контакт между ними. A. Raila также установил, что проникновение и движение озона в слое (колонке) зерна могут быть выражены кинетическим дифференциалом – уравнением распространения [66].

По мнению ряда авторов, в частности F. Mendez и S. A. Kells, проникновение газообразного озона в слой зерна состоит из двух фаз [53, 56]. В ходе первой «пассивной» фазы происходит активное взаимодействие озона с различными веществами в поверхностных слоях зерна, в результате чего его концентрация снижается, а диффузия происходит медленно. По сообщению J. N. Wu, после первой фазы концентрация газа снизилась на 15 % [54]. После того, как различные вещества в составе зернового сырья прореагируют с озоном, наступает вторая «активная» фаза, в ходе которой газ свободно перемещается через слой зерна, активно воздействуя на патогенные организмы [60, 67].

Тем не менее, некоторые ученые, в частности A. A. Isikber, считают, что озон, в отличие от других средств химической защиты, не может проникать достаточно глубоко в массу зерна [16, 61]. C. G. Athanassiou, исследуя содержание насекомых в колонках зерна глубиной 70 см после озонирования, установил, что их смертность в различных точках уменьшалась по мере удаления от точки входа потока озона и увеличения толщины разделяющего их слоя сырья [59]. Это отличает его от других газообразных инсектицидов, в частности азота [16]. A. A. Isikber полагает, что инсектицидная эффективность озона имеет отрицательную корреляцию с количеством обрабатываемого зерна [61].

Для решения проблемы обеспечения постоянной концентрации озона во всех точках емкости с зерном предложены две технологические схемы [16, 67]. Согласно

первой, для этого необходимо увеличить скорость потока газообразного озона либо его начальную концентрацию, что на практике встречает трудности и не полностью обеспечивает требуемый результат. Согласно второй, в емкости с зерном необходимо создать не одну, а множество точек входа для озона, что позволит распределить его более равномерно, однако это увеличивает стоимость системы озонирования.

Помимо этого, для повышения эффективности озонирования некоторые авторы рекомендуют осуществлять перемешивание зерна механическими устройствами [19].

С целью более экономичной организации процесса озонирования зерна J. A. Hardin предложил технологическую схему, предусматривающую рециркуляцию с обратной связью, которая позволяет захватывать и повторно использовать озон, уже прошедший через массу зерна [67].

Анализ публикаций позволяет сделать вывод, что необходимы дополнительные исследования, направленные на разработку методов, направленных на поддержание постоянной концентрации газообразного озона в слое зерна на различных расстояниях от его источника, обеспечивать его лучшее проникновение и сокращение продолжительности первой «пассивной» фазы озонирования.

Достоинства и недостатки озонирования как метода обеззараживания кормового сырья. Самое важное достоинство озонирования по сравнению с другими методами дезинфекции – это его универсальность в отношении действия на различные патогенные микроорганизмы, токсичные вещества и насекомых-вредителей [10]. Озон после применения сравнительно быстро превращается в безопасный кислород, в отличие от иных, используемых для этих целей химических веществ, остатки которых необходимо удалять из сырья [19]. Другое важное достоинство – универсальность действия на различные виды сырья, отсутствие значительных побочных эффектов, ухудшающих качество готовой продукции [18], что позволяет использовать озон при производстве «органических продуктов» [12]. Озонирование – это экономически выгодная технология, более рентабельная, чем применение иных химических средств защиты [18, 68]. К достоинствам применения озона следует отнести отсутствие образования вредных побочных продуктов в ходе его применения, но это относится только к случаю его использования в форме газа против микроорганизмов и насекомых [10, 18].

К недостаткам озонирования следует отнести различную чувствительность разных видов и жизненных форм микроорганизмов и насекомых к действию озона, что затрудняет подбор его эффективной концентрации [10, 18, 40]. При этом избыточное увеличение концентрации газа может привести к негативному воздействию на содержащиеся в сырье питательные вещества [18, 37, 38, 40].

Применение озона в форме водного раствора несет в себе риск образования токсичных веществ при его взаимодействии с содержащимися в жидкости примесями, в частности с соединениями хлора и органическими веществами [12, 19], поэтому предварительная очистка воды является необходимой частью процесса озонирования [18].

Формирование новых потенциально опасных веществ в результате взаимодействия озона с микотоксинами и пестицидами является основным возможным негативным эффектом озонирования сырья [19, 69]. Однако точно не известно, насколько часто и при каких именно условиях происходит образование таких токсичных продуктов, что требует проведения дополнительных исследований [18, 21, 70].

Озон является веществом, токсичным для человека, поэтому в ходе

осуществления процесса озонирования необходимо применять меры для предотвращения попадания газообразного озона в атмосферу производственных помещений и превышения его предельно допустимой концентрации [19, 71]. Меры безопасности особенно важны при работе с озонированной водой, так как в результате выделения из нее газообразного озона возможно превышение его безопасной концентрации [19].

Озон имеет очень высокую окислительную способность и при контакте с металлами вызывает их быструю коррозию [20], поэтому металлические детали в системах озонирования необходимо использовать очень ограниченно, по возможности заменяя их на детали из коррозионностойких материалов [19].

Как уже было сказано выше, способность газообразного озона к проникновению через слой сырья, особенно порошкообразного, является ограниченной, что создает определенные трудности для его применения [16, 62].

За последнее время производительность и эффективность генераторов озона значительно повысилась, но они все еще остаются достаточно дорогостоящими и громоздкими [19]. Для более широко применения в сельскохозяйственном производстве необходимо снизить их стоимость и размеры, создав более компактные и менее энергоемкие модели.

Выводы

В результате обзора результатов ранее выполненных исследований установлено, что озонирование является эффективным способом уменьшения содержания микотоксинов в кормовом сырье, причем наибольший эффект дает воздействие газообразного озона с концентрацией 2,8–62 г/м^3 и продолжительностью 15–480 мин. В результате достигается редукция микотоксинов, в частности афлатоксинов, на 48–86 %. Но для широкого внедрения озонирования в технологический процесс комбикормовых заводов с целью удаления микотоксинов необходимо проведение дополнительных исследований по определению рациональных параметров его осуществления.

Также озонирование является эффективным способом разрушения пестицидов, содержащихся в растительном сырье. Установлено, что воздействие газообразного озона или его водного раствора с концентрацией 3–240 мг/л и продолжительностью 60–600 мин способствует редукции пестицидов на 50–95 %. Эффективность действия газообразного озона повышается при увеличении влажности сырья. Для широкого внедрения озонирования с целью удаления пестицидов необходимо проведение дополнительных исследований по определению рациональных параметров его осуществления.

Установлено, что озонирование является эффективным способом деконтаминации кормового сырья, обеспечивающим значительной снижение содержания патогенных бактерией и грибов (на 60–90 %), причем эффективность повышается при увеличении концентрации озона, продолжительности его действия и температуры.

Установлено, что озонирование является эффективным средством борьбы с насекомыми, поражающими кормовое сырье. Эффективность действия газообразного озона на насекомых-вредителей составляет от 70 до 100 %. Однако для этого необходимо длительное (2–6 ч) действие газа с концентрацией более 10 мг/л.

Определены способы практического осуществления озонирования сырья. При воздействии на слой сырья значительной глубины для обеспечения его проницаемости газообразным озоном рационально увеличить скорость потока газообразного озона и его начальную концентрацию, либо создать в емкости с сырьем несколько точек входа для озона.

Выявлены достоинства и недостатки озонирования как метода обеззараживания кормового сырья, указаны способы минимизации негативного действия озона.

Анализ научных публикаций по исследуемой теме показал, что, несмотря на высокий потенциал, метод озонирования сырья с целью обеспечения его биологической безопасности все еще не нашел широкого применения в сельскохозяйственном производстве и комбикормовой промышленности. Чтобы обеспечить его более широкое применение, необходимо провести дополнительные исследования, направленные на повышение эффективности озонирования путем стандартизации параметров его осуществления. Для этого необходимо определить рациональные значения концентрации озона и продолжительности обработки и сопутствующих параметров для каждого вида сырья и каждого вида поражающих его микроорганизмов, насекомых, включая различные стадии их развития, а также микотоксинов и пестицидов, обратив особенное внимание на изучение комплексной эффективности озонирования в отношении нескольких патогенных факторов.

Необходимо масштабирование исследований по озонированию, выполненных в лабораториях, для применения на промышленных предприятиях с высокой производительностью и непрерывным потоком сырья.

Разработка технических решений, улучшающих диффузию газообразного озона в массе зернового сырья, значительного повысит его безопасность и сохранность в результате эффективной обработки.

Таким образом, решение сформулированных выше задач позволит реализовать высокий потенциал озонирования для обеспечения биологической безопасности сырья при производстве кормов.

Литература

1. Abdallah M. F., Girgin G., Baydar T. Occurrence, prevention and limitation of mycotoxins in feeds // Animal Nutrition and Feed Technology. 2015. Vol. 15. No. 3. P. 471–490. DOI: 10.5958/0974-181x.2015.00048.7.

2. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 2. Зерно пшеницы, ячменя, овса, кукурузы // Ветеринария сегодня. 2020. № 2. С. 139–145. DOI: 10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145.

3. Yang C., Song G., Lim W. Effects of mycotoxin-contaminated feed on farm animals // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 389. P. 122087. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122087.

4. Magnoli A. P., Poloni V. L., Cavaglieri L. Impact of mycotoxin contamination in the animal feed industry // Current Opinion in Food Science. 2019. Vol. 29. P. 99–108. DOI: 10.1016/j.cofs.2019.08.009.

5. Richard J. L. Some major mycotoxins and their mycotoxicoses – an overview // International Journal of Food Microbiology. 2007. Vol. 119. No. 1-2. P. 3–10. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.019.

6. Bryden W. L. Mycotoxin contamination of the feed supply chain: implications for animal productivity and feed security // Animal Feed Science and Technology. 2012. Vol. 173. No. 1-2. P. 134–158. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2011.12.014.

7. Čolović R., Puvača N., Cheli F., Avantaggiato G., Greco D., Duragić O., Kos J., Pinotti L. Decontamination of mycotoxin-contaminated feedstuffs and compound feed // Toxins. 2019. Vol. 11. No. 11. P. 617. DOI: 10.3390/toxins11110617.

8. Peng W-X., Marchal J. L. M., van der Poel A. F. B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing // Animal Feed Science and Technology. 2018. Vol. 237. P. 129–153. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2018.01.017.

9. Amado I. R., Vázquez J. A., Guerra N. P., Pastrana L. Thermal resistance of *Salmonella enterica*, *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* isolated from vegetable feed ingredients // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2014. Vol. 94. No. 11. P. 2274–2281. DOI: 10.1002/jsfa.6554.

10. Deng L. Z., Tao Y., Mujumdar A. S., Pan Z., Chen C., Yang X. H., Liu Z.-L., Wang H., Xiao H. W. Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 106. P. 104–112. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.012.

11. González-Rodríguez R. M., Rial-Otero R., Cancho-Grande B., Gonzalez-Barreiro C., Simal-Gándara J. A review on the fate of pesticides during the processes within the food-production chain // Critical

Reviews in Food Science and Nutrition. 2011. Vol. 51. No. 2. P. 99–114. DOI: 10.1080/10408390903432625.

12. Pandiselvam R., Kaavya R., Jayanath Y., Veenuttranon K., Lueprasitsakul P., Divya V., Kothakota A., Ramesh S. V. Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods – a review // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 97. P. 38–54. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.017.

13. Козич И. А., Бречко Е. В. Защита зерна от вредителей запасов // Защита и карантин растений. 2018. № 12. С. 16–19.

14. Alberts J. F., Lilly M., Rheeder J. P., Burger H-M., Shephard G. S., Gelderblom W. C. A. Technological and community-based methods to reduce mycotoxin exposure // Food Control. 2017. Vol. 73. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.05.029.

15. Deng L. Z., Mujumdar A. S., Pan Z., Vidyarthi S. K., Xu J., Zielinska M., Xiao H. W. Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020. Vol. 60. No. 15. P. 2481–2508. DOI: 10.1080/10408398.2019.1649633.

16. Isikber A. A., Athanassiou C. G. The use of ozone gas for the control of insects and micro-organisms in stored products // Journal of Stored Products Research. 2015. Vol. 64. P. 139–145. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.06.006.

17. 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. Vol. 12. No. 8. P. 486. DOI: 10.3390/toxins12080486.

18. Brodowska A. J., 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. Vol. 58. No. 13. P. 2176–2201. DOI: 10.1080/10408398.2017.1308313.

19. Afsah-Hejri L., Hajeb P., Ehsani R. J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020. Vol. 19. No. 4. P. 1777–1808. DOI: 10.1111/1541-4337.12594.

20. Pandiselvam R., Sunoj S., Manikantan M. R., Kothakota A., Hebbar K. B. Application and kinetics of ozone in food preservation // Ozone: Science and Engineering. 2017. Vol. 39. No. 2. P. 115–126. DOI: 10.1080/01919512.2016.1268947.

21. Pandiselvam R., Subhashini S., Banuu Priya E. P., Kothakota A., Ramesh S. V., Shahir S. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety // Ozone: Science & Engineering. 2019. Vol. 41. No. 1. P. 17–34. DOI: 10.1080/01919512.2018.1490636.

22. Помогаева В. В., Стребкова Ю. И. Анализ основных методов обеззараживания воды // Российский инженер. 2017. Т. 3. № 2. С. 31–37.

23. Baggio A., Marino M., Innocente N., Celotto M., Maifreni M. Antimicrobial effect of oxidative technologies in food processing: an overview // European Food Research and Technology. 2020. Vol. 246. No. 4. P. 669–692. DOI: 10.1007/s00217-020-03447-6.

24. Khadre M. A., Yousef A. E., Kim J. G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review // Journal of Food Science. 2001. Vol. 66. No. 9. P. 1242–1252. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2001.tb15196.x.

25. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review // Communications of the Association for Information Systems. 2015. Vol. 37. P. 879–910. DOI: 10.17705/1cais.03743.

26. Torraco R. J. Writing integrative literature reviews: using the past and present to explore the future // Human Resource Development Review. 2016. Vol. 15. No. 4. P. 404–428. DOI: 10.1177/1534484316671606.

27. Wang L., Luo Y., Luo X., Wang R., Li Y., Li Y., Chen Z. Effect of deoxynivalenol detoxification by ozone treatment in wheat grains // Food Control. 2016. Vol. 66. P. 137–144. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.01.038.

28. Guo Y., Zhao L., Ma Q., Ji C. Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: A review // Food Research International. 2021. Vol. 140. P. 109878. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109878.

29. Jalili M. A review on aflatoxins reduction in food // Iranian Journal of Health, Safety and Environment. 2016. Vol. 3. No. 1. P. 445–459.

30. Luo X., Wang R., Wang L., Li Y., Bian Y., Chen Z. Effect of ozone treatment on aflatoxin B_1 and safety evaluation of ozonized corn // Food Control. 2014. Vol. 37. P. 171–176. DOI: 10.1016/j.foodcont.2013.09.043.

31. Trombete F. M., Freitas-Silva O., Saldanha T., Venâncio A. A., Fraga M. E. Ozone against mycotoxins and pesticide residues in food: current applications and perspectives // International Food Research Journal. 2016. Vol. 26. P. 2545–2556.

32. Torlak E., Akata I., Erci F., Uncu A. T. Use of gaseous ozone to reduce aflatoxin B_1 and microorganisms in poultry feed // Journal of Stored Products Research. 2016. Vol. 68. P. 44–49.

DOI: 10.1016/j.jspr.2016.04.003.

33. Kouchesfahani M. M., Alimohammadi M., Khaniki G. J., Nodehi R. N., Aghamohseni Z., Moazeni M., Rezaie S. Antifungal effects of ozonated water on *Aspergillus parasiticus*: a new approach to prevent wheat contamination // Journal of Food Safety. 2015. Vol. 35. No. 3. P. 295–302. DOI: 10.1111/jfs.12159.

34. Alexandre A. P. S., Vela-Paredes R. S., Santos A. S., Costa N. S., Canniatti-Brazaca S. G., Calori-Domingues M. A., Augusto P. E. D. Ozone treatment to reduce deoxynivalenol (DON) and zearalenone (ZEN) contamination in wheat bran and its impact on nutritional quality // Food Additives & Contaminants: Part A. 2018. Vol. 35. No. 6. P. 1189–1199. DOI: 10.1080/19440049.2018.1432899.

35. Alexandre A. P. S., Castanha N., Costa N. S., Santos A. S., Badiale-Furlong E., Augusto P. E. D., Calori-Domingues M. A. Ozone technology to reduce zearalenone contamination in whole maize flour: degradation kinetics and impact on quality // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2019. Vol. 99. No. 15. P. 6814–6821. DOI: 10.1002/jsfa.9966.

36. Porto Y. D., Trombete F. M., Freitas-Silva O., de Castro I. M., Direito G. M., Ascheri J. L. R. Gaseous ozonation to reduce aflatoxins levels and microbial contamination in corn grifts // Microorganisms. 2019. Vol. 7. No. 8. P. 220. DOI: 10.3390/microorganisms7080220.

37. Wang Y., King J. M., Xu Z., Losso J., Prudente A. Lutein from ozone-treated corn retains antimutagenic properties // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008. Vol. 56. No. 17. P. 7942–7949. DOI: 10.1021/jf801562v.

38. Prudente Jr. A. D., King J. M. Efficacy and safety evaluation of ozonation to degrade aflatoxin in corn // Journal of Food Science. 2002. Vol. 67. No. 8. P. 2866–2872. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08830.x.

39. Temba B. A., Sultanbawa Y., Kriticos D. J., Fox G. P., Harvey J. J., Fletcher M. T. Tools for defusing a major global food and feed safety risk: nonbiological postharvest procedures to decontaminate mycotoxins in foods and feeds // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2016. Vol. 64. No. 47. P. 8959–8972. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b03777.

40. Miller F. A., Silva C. L., Brandão T. R. A review on ozone-based treatments for fruit and vegetables preservation // Food Engineering Reviews. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 77–106. DOI: 10.1007/s12393-013-9064-5.

41. 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 & Technology. 2019. Vol. 54. No. 2. P. 301–312. DOI: 10.1111/ijfs.13938.

42. De Avila M. B. R., Faroni L. R. A., Heleno F. F., de Queiroz M. E. L., Costa L. P. Ozone as degradation agent of pesticide residues in stored rice grains // Journal of Food Science and Technology. 2017. Vol. 54. No. 12. P. 4092–4099. DOI: 10.1007/s13197-017-2884-1.

43. Jijun G., Zhonghai L., Haiyan Z., Jing T., Yinghong L. Ozone/ultrasound degradation effect on residual pesticides in commercially available apples // 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/icbbe.2011.5781531.

44. Whangchai K., Uthaibutra J., Phiyanalinmat S., Pengphol S., Nomura N. Effect of ozone treatment on the reduction of chlorpyrifos residues in fresh lychee fruits // Ozone: Science & Engineering. 2011. Vol. 33. No. 3. P. 232–235. DOI: 10.1080/01919512.2011.554313.

45. De Souza L. P., Faroni L. R. D. A., Heleno F. F., Pinto F. G., de Queiroz M. E. L. R., Prates L. H. F. Ozone treatment for pesticide removal from carrots: optimization by response surface methodology // Food Chemistry. 2018. Vol. 243. P. 435–441. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.09.134.

46. Wu Y., An Q., Li D., Wu J., Pan C. Comparison of different home/commercial washing strategies for ten typical pesticide residue removal effects in kumquat, spinach and cucumber // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. No. 3. P. 472. DOI: 10.3390/ijerph16030472.

47. Savi G. D., Piacentini K. C., Scussel V. M. Reduction in residues of deltamethrin and fenitrothion on stored wheat grains by ozone gas // Journal of Stored Products Research. 2015. Vol. 61. P. 65–69. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.12.002.

48. Velioglu Y. S., Ergen S. F., Aksu P., Altindag A. Effects of ozone treatment on the degradation and toxicity of several pesticides in different grou // Journal of Agricultural Sciences. 2018. Vol. 24. No. 2. P. 245–255. DOI: 10.15832/ankutbd.446448.

49. Freitas-Silva O., Venancio A. Ozone applications to prevent and degrade mycotoxins: a review // Drug Metabolism Reviews. 2010. Vol. 42. No. 4. P. 612–620. DOI: 10.3109/03602532.2010.484461.

50. Finch G. R., Smith D. W., Stiles M. E. Dose-response of *Escherichia coli* in ozone demand-free phosphate buffer // Water Research. 1988. Vol. 22. No. 12. P. 1563–1570. DOI: 10.1016/0043-1354(88)90169-8.

51. Zorlugenç B., Kiroglu Zorlugenç F., Oztekin S., Evliya I. B. The influence of gaseous ozone and ozonated water on microbial flora and degradation of aflatoxin B_1 in dried figs // Food and Chemical Toxicology. 2008. Vol. 46. No. 12. P. 3593–3597. DOI: 10.1016/j.fct.2008.09.003.

52. Restaino L., Frampton E., Hemphill J., Palnikar P. Efficacy of ozonated water against various food

related micro-organisms // Applied and Environmental Microbiology. 1995. Vol. 61. No. 9. P. 3471–3475. DOI: 10.1128/aem.61.9.3471-3475.1995.

53. Kells S. A., Mason L. J., Maier D. E., Woloshuk C. P. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize // Journal of Stored Products Research. 2001. Vol. 37. No. 4. P. 371–382. DOI: 10.1016/s0022-474x(00)00040-0.

54. Wu J. N., Doan H., Cuenca M. A. Investigation of gaseous ozone as an antifungal fumigant for stored wheat // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2006. Vol. 81. No. 7. P. 1288–1293. DOI: 10.1002/jctb.1550.

55. Allen B., Wu J. N., Doan H. Inactivation of fungi associated with barley grain by gaseous ozone // Journal of Environmental Science and Health, Part B. 2003. Vol. 38. No. 5. P. 617–630. DOI: 10.1081/pfc-120023519.

56. Mendez F., Maier D. E., Mason L. J., Woloshuk C. P. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance // Journal of Stored Products Research. 2003. Vol. 39. P. 33–44. DOI: 10.1016/S0022-474X(02)00015-2.

57. Dubois M., Coste C., Despres A. G., Efstathiou T., Nio C., Dumont E., Parent-Massin D. 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 & Contaminants. 2006. Vol. 23. No. 1. P. 1–15. DOI: 10.1080/02652030500316728.

58. McDonough M. X., Campabadal C. A., Mason L. J., Maier D. E., Denvir A., Woloshuk C. P. Ozone application in a modified screw conveyor to treat grain for insect pests, fungal contaminants and mycotoxins // Journal of Stored Products Research. 2011. Vol. 47. No. 3. P. 249–254. DOI: 10.1016/j.jspr.2011.04.001.

59. Athanassiou C. G., Milonas D. N., Saitanis C. J. Insecticidal effect of ozone against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae), *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) and *Tribolium confusum* Jacquelin Du Val (Coleoptera: Tenebrionidae): influence of commodity // Proceedings of the 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products. Chengdu, China: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2008. P. 61–71.

60. McDonough M. X., Mason L. J., Woloshuk C. P. Susceptibility of stored product insects to high concentrations of ozone at different exposure intervals // Journal of Stored Products Research. 2011. Vol. 47. No. 4. P. 306–310. DOI: 10.1016/j.jspr.2011.04.003.

61. Isikber A. A., Oztekin S. Comparison of susceptibility of two stored product insects, *Ephestia kuehniella* Zeller and *Tribolium confusum* du Val to gaseous ozone // Journal of Stored Products Research. 2009. Vol. 45. No. 3. P. 159–164. DOI: 10.1016/j.jspr.2008.12.003.

62. Tiwari B. K., Brennan C. S., Curran T., Gallagher E., Cullen P. J., O'Donnell C. P. Application of ozone in grain processing // Journal of Cereal Science. 2010. Vol. 51. No. 3. P. 248–255. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

63. Hoback W. W., Stanley D. W. Insects in hypoxia // Journal of Insect Physiology. 2001. Vol. 47. No. 6. P. 533–542. DOI: 10.1016/S0022-1910(00)00153-0.

64. Takahashi M., Chiba K., Li P. Formation of hydroxyl radicals by collapsing ozone microbubbles under strongly acidic conditions // Journal of Physical Chemistry B. 2007. Vol. 111. No. 39. P. 11443–11446. DOI: 10.1021/jp074727m.

65. Ikeura H., Kobayashi F., Tamaki M. Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods // Journal of Food Engineering. 2011. Vol. 103. No. 3. P. 345–349. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.002.

66. Raila A., Lugauskas A., Steponavicius D., Railiene M., Steponaviciene A., Zvicevicius E. Application of ozone for reduction of mycological infection in wheat grain // Annals of Agricultural and Environmental Medicine. 2006. Vol. 13. No. 2. P. 287–294.

67. Hardin J. A., Jones C. L., Bonjour E. L., Noyes R. T., Beeby R. L., Eltiste D. A., Decker S. Ozone fumigation of stored grain; closed-loop recirculation and the rate of ozone consumption // Journal of Stored Products Research. 2010. Vol. 46. No. 3. P. 149–154. DOI: 10.13031/2013.27354.

68. 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. Vol. 95. No. 4. P. 662–671. DOI: 10.1002/jsfa.6776.

69. Freire L., Sant'Ana A. S. Modified mycotoxins: an updated review on their formation, detection, occurrence, and toxic effects // Food and Chemical Toxicology. 2018. Vol. 111. P. 189–205. DOI: 10.1016/j.fct.2017.11.021.

70. Zhou Y., Wu S., Wang F., Li Q., He C., Duan N., Wang Z. Assessing the toxicity *in vitro* of degradation products from deoxynivalenol photocatalytic degradation by using upconversion nanoparticles@TiO_2 composite // Chemosphere. 2020. Vol. 238. P. 124648. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124648.

71. Zhu F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products // Food Chemistry. 2018. Vol. 264. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.05.047.

References

1. Abdallah M. F., Girgin G., Baydar T. Occurrence, prevention and limitation of mycotoxins in feeds // Animal Nutrition and Feed Technology. 2015. Vol. 15. No. 3. P. 471–490. DOI: 10.5958/0974-181x.2015.00048.7.
2. Kononenko G. P., Burkin A. A., Zotova Ye. V. Mycotoxilogical monitoring. Part 2. Wheat, barley, oat and maize grain // Veterinary Science Today. 2020. No. 2. P. 139–145. DOI: 10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145
3. Yang C., Song G., Lim W. Effects of mycotoxin-contaminated feed on farm animals // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 389. P. 122087. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122087.
4. Magnoli A. P., Poloni V. L., Cavaglieri L. Impact of mycotoxin contamination in the animal feed industry // Current Opinion in Food Science. 2019. Vol. 29. P. 99–108. DOI: 10.1016/j.cofs.2019.08.009.
5. Richard J. L. Some major mycotoxins and their mycotoxicoses – an overview // International Journal of Food Microbiology. 2007. Vol. 119. No. 1-2. P. 3–10. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.019.
6. Bryden W. L. Mycotoxin contamination of the feed supply chain: implications for animal productivity and feed security // Animal Feed Science and Technology. 2012. Vol. 173. No. 1-2. P. 134–158. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2011.12.014.
7. Čolović R., Puvača N., Cheli F., Avantaggiato G., Greco D., Duragić O., Kos J., Pinotti L. Decontamination of mycotoxin-contaminated feedstuffs and compound feed // Toxins. 2019. Vol. 11. No. 11. P. 617. DOI: 10.3390/toxins11110617.
8. Peng W-X., Marchal J. L. M., van der Poel A. F. B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing // Animal Feed Science and Technology. 2018. Vol. 237. P. 129–153. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2018.01.017.
9. Amado I. R., Vázquez J. A., Guerra N. P., Pastrana L. Thermal resistance of *Salmonella enterica*, *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* isolated from vegetable feed ingredients // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2014. Vol. 94. No. 11. P. 2274–2281. DOI: 10.1002/jsfa.6554.
10. Deng L. Z., Tao Y., Mujumdar A. S., Pan Z., Chen C., Yang X. H., Liu Z.-L., Wang H., Xiao H. W. Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 106. P. 104–112. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.012.
11. González-Rodríguez R. M., Rial-Otero R., Cancho-Grande B., Gonzalez-Barreiro C., Simal-Gándara J. A review on the fate of pesticides during the processes within the food-production chain // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2011. Vol. 51. No. 2. P. 99–114. DOI: 10.1080/10408390903432625.
12. Pandiselvam R., Kaavya R., Jayanath Y., Veenuttranon K., Lueprasitsakul P., Divya V., Kothakota A., Ramesh S. V. Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods – a review // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 97. P. 38–54. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.017.
13. Kozich I. A., Brechko E. V. Protection of grain from the storage pests // Zashchita i Karantin Rastenij. 2018. No. 12. P. 16–19.
14. Alberts J. F., Lilly M., Rheeder J. P., Burger H-M., Shephard G. S., Gelderblom W. C. A. Technological and community-based methods to reduce mycotoxin exposure // Food Control. 2017. Vol. 73. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.05.029.
15. Deng L. Z., Mujumdar A. S., Pan Z., Vidyarthi S. K., Xu J., Zielinska M., Xiao H. W. Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020. Vol. 60. No. 15. P. 2481–2508. DOI: 10.1080/10408398.2019.1649633.
16. Isikber A. A., Athanassiou C. G. The use of ozone gas for the control of insects and micro-organisms in stored products // Journal of Stored Products Research. 2015. Vol. 64. P. 139–145. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.06.006.
17. 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. Vol. 12. No. 8. P. 486. DOI: 10.3390/toxins12080486.
18. Brodowska A. J., 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. Vol. 58. No. 13. P. 2176–2201. DOI: 10.1080/10408398.2017.1308313.
19. Afsah-Hejri L., Hajeb P., Ehsani R. J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: a review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020. Vol. 19. No. 4. P. 1777–1808. DOI: 10.1111/1541-4337.12594.
20. Pandiselvam R., Sunoj S., Manikantan M. R., Kothakota A., Hebbar K. B. Application and kinetics of ozone in food preservation // Ozone: Science and Engineering. 2017. Vol. 39. No. 2. P. 115–126. DOI: 10.1080/01919512.2016.1268947

21. Pandiselvam R., Subhashini S., Banuu Priya E. P., Kothakota A., Ramesh S. V., Shahir S. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety // Ozone: Science & Engineering. 2019. Vol. 41. No. 1. P. 17–34. DOI: 10.1080/01919512.2018.1490636.

22. Pomogaeva V. V., Strebkova Yu. I. Analysis of main water disinfection methods // Rossiyskij Inzhener. 2017. Vol. 3. No. 2. P. 31–37.

23. Baggio A., Marino M., Innocente N., Celotto M., Maifreni M. Antimicrobial effect of oxidative technologies in food processing: an overview // European Food Research and Technology. 2020. Vol. 246. No. 4. P. 669–692. DOI: 10.1007/s00217-020-03447-6.

24. Khadre M. A., Yousef A. E., Kim J. G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review // Journal of Food Science. 2001. Vol. 66. No. 9. P. 1242–1252. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2001.tb15196.x.

25. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review // Communications of the Association for Information Systems. 2015. Vol. 37. P. 879–910. DOI: 10.17705/1cais.03743.

26. Torraco R. J. Writing integrative literature reviews: using the past and present to explore the future // Human Resource Development Review. 2016. Vol. 15. No. 4. P. 404–428. DOI: 10.1177/1534484316671606.

27. Wang L., Luo Y., Luo X., Wang R., Li Y., Li Y., Chen Z. Effect of deoxynivalenol detoxification by ozone treatment in wheat grains // Food Control. 2016. Vol. 66. P. 137–144. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.01.038.

28. Guo Y., Zhao L., Ma Q., Ji C. Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: a review // Food Research International. 2021. Vol. 140. P. 109878. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109878.

29. Jalili M. A review on aflatoxins reduction in food // Iranian Journal of Health, Safety and Environment. 2016. Vol. 3. No. 1. P. 445–459.

30. Luo X., Wang R., Wang L., Li Y., Bian Y., Chen Z. Effect of ozone treatment on aflatoxin B_1 and safety evaluation of ozonized corn // Food Control. 2014. Vol. 37. P. 171–176. DOI: 10.1016/j.foodcont.2013.09.043

31. Trombete F. M., Freitas-Silva O., Saldanha T., Venâncio A. A., Fraga M. E. Ozone against mycotoxins and pesticide residues in food: current applications and perspectives // International Food Research Journal. 2016. Vol. 26. P. 2545–2556.

32. Torlak E., Akata I., Erci F., Uncu A. T. Use of gaseous ozone to reduce aflatoxin B_1 and microorganisms in poultry feed // Journal of Stored Products Research. 2016. Vol. 68. P. 44–49. DOI: 10.1016/j.jspr.2016.04.003.

33. Kouchesfahani M. M., Alimohammadi M., Khaniki G. J., Nodehi R. N., Aghamohseni Z., Moazeni M., Rezaie S. Antifungal effects of ozonated water on *Aspergillus parasiticus*: a new approach to prevent wheat contamination // Journal of Food Safety. 2015. Vol. 35. No. 3. C. 295–302. DOI: 10.1111/jfs.12159.

34. Alexandre A. P. S., Vela-Paredes R. S., Santos A. S., Costa N. S., Canniatti-Brazaca S. G., Calori-Domingues M. A., Augusto P. E. D. Ozone treatment to reduce deoxynivalenol (DON) and zearalenone (ZEN) contamination in wheat bran and its impact on nutritional quality // Food Additives & Contaminants: Part A. 2018. Vol. 35. No. 6. P. 1189–1199. DOI: 10.1080/19440049.2018.1432899.

35. Alexandre A. P. S., Castanha N., Costa N. S., Santos A. S., Badiale-Furlong E., Augusto P. E. D., Calori-Domingues M. A. Ozone technology to reduce zearalenone contamination in whole maize flour: degradation kinetics and impact on quality // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2019. Vol. 99. No. 15. P. 6814–6821. DOI: 10.1002/jsfa.9966.

36. Porto Y. D., Trombete F. M., Freitas-Silva O., de Castro I. M., Direito G. M., Ascheri J. L. R. Gaseous ozonation to reduce aflatoxins levels and microbial contamination in corn grifts // Microorganisms. 2019. Vol. 7. No. 8. P. 220. DOI: 10.3390/microorganisms7080220.

37. Wang Y., King J. M., Xu Z., Losso J., Prudente A. Lutein from ozone-treated corn retains antimutagenic properties // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008. Vol. 56. No. 17. P. 7942–7949. DOI: 10.1021/jf801562v.

38. Prudente Jr. A. D., King J. M. Efficacy and safety evaluation of ozonation to degrade aflatoxin in corn // Journal of Food Science. 2002. Vol. 67. No. 8. P. 2866–2872. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08830.x.

39. Temba B. A., Sultanbawa Y., Kriticos D. J., Fox G. P., Harvey J. J., Fletcher M. T. Tools for defusing a major global food and feed safety risk: nonbiological postharvest procedures to decontaminate mycotoxins in foods and feeds // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2016. Vol. 64. No. 47. P. 8959–8972. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b03777.

40. Miller F. A., Silva C. L., Brandão T. R. A review on ozone-based treatments for fruit and vegetables preservation // Food Engineering Reviews. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 77–106. DOI: 10.1007/s12393-013-9064-5.

41. 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 & Technology. 2019. Vol. 54. No. 2. P. 301–312. DOI: 10.1111/ijfs.13938.

42. De Avila M. B. R., Faroni L. R. A., Heleno F. F., de Queiroz M. E. L., Costa L. P. Ozone as degradation agent of pesticide residues in stored rice grains // Journal of Food Science and Technology. 2017. Vol. 54. No. 12. P. 4092–4099. DOI: 10.1007/s13197-017-2884-1.

43. Jijun G., Zhonghai L., Haiyan Z., Jing T., Yinghong L. Ozone/ultrasound degradation effect on residual pesticides in commercially available apples // 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/icbbe.2011.5781531.

44. Whangchai K., Uthaibutra J., Phiyanalinmat S., Pengphol S., Nomura N. Effect of ozone treatment on the reduction of chlorpyrifos residues in fresh lychee fruits // Ozone: Science & Engineering. 2011. Vol. 33. No. 3. P. 232–235. DOI: 10.1080/01919512.2011.554313.

45. De Souza L. P., Faroni L. R. D. A., Heleno F. F., Pinto F. G., de Queiroz M. E. L. R., Prates L. H. F. Ozone treatment for pesticide removal from carrots: optimization by response surface methodology // Food Chemistry. 2018. Vol. 243. P. 435–441. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.09.134.

46. Wu Y., An Q., Li D., Wu J., Pan C. Comparison of different home/commercial washing strategies for ten typical pesticide residue removal effects in kumquat, spinach and cucumber // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. No. 3. P. 472. DOI: 10.3390/ijerph16030472.

47. Savi G. D., Piacentini K. C., Scussel V. M. Reduction in residues of deltamethrin and fenitrothion on stored wheat grains by ozone gas // Journal of Stored Products Research. 2015. Vol. 61. P. 65–69. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.12.002.

48. Velioglu Y. S., Ergen S. F., Aksu P., Altindag A. Effects of ozone treatment on the degradation and toxicity of several pesticides in different grou // Journal of Agricultural Sciences. 2018. Vol. 24. No. 2. P. 245–255. DOI: 10.15832/ankutbd.446448.

49. Freitas-Silva O., Venancio A. Ozone applications to prevent and degrade mycotoxins: a review // Drug Metabolism Reviews. 2010. Vol. 42. No. 4. P. 612–620. DOI: 10.3109/03602532.2010.484461.

50. Finch G. R., Smith D. W., Stiles M. E. Dose-response of *Escherichia coli* in ozone demand-free phosphate buffer // Water Research. 1988. Vol. 22. No. 12. P. 1563–1570. DOI: 10.1016/0043-1354(88)90169-8.

51. Zorlugenç B., Kiroglu Zorlugenç F., Oztekin S., Evliya I. B. The influence of gaseous ozone and ozonated water on microbial flora and degradation of aflatoxin B_1 in dried figs // Food and Chemical Toxicology. 2008. Vol. 46. No. 12. P. 3593–3597. DOI: 10.1016/j.fct.2008.09.003.

52. Restaino L., Frampton E., Hemphill J., Palnikar P. Efficacy of ozonated water against various food related micro-organisms // Applied and Environmental Microbiology. 1995. Vol. 61. No. 9. P. 3471–3475. DOI: 10.1128/aem.61.9.3471-3475.1995.

53. Kells S. A., Mason L. J., Maier D. E., Woloshuk C. P. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize // Journal of Stored Products Research. 2001. Vol. 37. No. 4. P. 371–382. DOI: 10.1016/s0022-474x(00)00040-0.

54. Wu J. N., Doan H., Cuenca M. A. Investigation of gaseous ozone as an antifungal fumigant for stored wheat // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2006. Vol. 81. No. 7. P. 1288–1293. DOI: 10.1002/jctb.1550.

55. Allen B., Wu J. N., Doan H. Inactivation of fungi associated with barley grain by gaseous ozone // Journal of Environmental Science and Health, Part B. 2003. Vol. 38. No. 5. P. 617–630. DOI: 10.1081/pfc-120023519.

56. Mendez F., Maier D. E., Mason L. J., Woloshuk C. P. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance // Journal of Stored Products Research. 2003. Vol. 39. P. 33–44. DOI: 10.1016/S0022-474X(02)00015-2.

57. Dubois M., Coste C., Despres A. G., Efstathiou T., Nio C., Dumont E., Parent-Massin D. 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 & Contaminants. 2006. Vol. 23. No. 1. P. 1–15. DOI: 10.1080/02652030500316728.

58. McDonough M. X., Campabadal C. A., Mason L. J., Maier D. E., Denvir A., Woloshuk C. P. Ozone application in a modified screw conveyor to treat grain for insect pests, fungal contaminants and mycotoxins // Journal of Stored Products Research. 2011. Vol. 47. No. 3. P. 249–254. DOI: 10.1016/j.jspr.2011.04.001.

59. Athanassiou C. G., Milonas D. N., Saitanis C. J. Insecticidal effect of ozone against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae), *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) and *Tribolium confusum* Jacquelin Du Val (Coleoptera: Tenebrionidae): influence of commodity // Proceedings of the 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products. Chengdu, China: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2008. P. 61–71.

60. McDonough M. X., Mason L. J., Woloshuk C. P. Susceptibility of stored product insects to high concentrations of ozone at different exposure intervals // Journal of Stored Products Research. 2011.

Vol. 47. No. 4. P. 306–310. DOI: 10.1016/j.jspr.2011.04.003.

61. Isikber A. A., Oztekin S. Comparison of susceptibility of two stored product insects, *Ephestia kuehniella* Zeller and *Tribolium confusum* du Val to gaseous ozone // Journal of Stored Products Research. 2009. Vol. 45. No. 3. P. 159–164. DOI: 10.1016/j.jspr.2008.12.003.

62. Tiwari B. K., Brennan C. S., Curran T., Gallagher E., Cullen P. J., O'Donnell C. P. Application of ozone in grain processing // Journal of Cereal Science. 2010. Vol. 51. No. 3. P. 248–255. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

63. Hoback W. W., Stanley D. W. Insects in hypoxia // Journal of Insect Physiology. 2001. Vol. 47. No. 6. P. 533–542. DOI: 10.1016/S0022-1910(00)00153-0.

64. Takahashi M., Chiba K., Li P. Formation of hydroxyl radicals by collapsing ozone microbubbles under strongly acidic conditions // Journal of Physical Chemistry B. 2007. Vol. 111. No. 39. P. 11443–11446. DOI: 10.1021/jp074727m.

65. Ikeura H., Kobayashi F., Tamaki M. Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods // Journal of Food Engineering. 2011. Vol. 103. No. 3. P. 345–349. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.002.

66. Raila A., Lugauskas A., Steponavicius D., Railiene M., Steponaviciene A., Zvicevicius E. Application of ozone for reduction of mycological infection in wheat grain // Annals of Agricultural and Environmental Medicine. 2006. Vol. 13. No. 2. P. 287–294.

67. Hardin J. A., Jones C. L., Bonjour E. L., Noyes R. T., Beeby R. L., Eltiste D. A., Decker S. Ozone fumigation of stored grain; closed-loop recirculation and the rate of ozone consumption // Journal of Stored Products Research. 2010. Vol. 46. No. 3. P. 149–154. DOI: 10.13031/2013.27354.

68. 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. Vol. 95. No. 4. P. 662–671. DOI: 10.1002/jsfa.6776.

69. Freire L., Sant'Ana A. S. Modified mycotoxins: an updated review on their formation, detection, occurrence, and toxic effects // Food and Chemical Toxicology. 2018. Vol. 111. P. 189–205. DOI: 10.1016/j.fct.2017.11.021.

70. Zhou Y., Wu S., Wang F., Li Q., He C., Duan N., Wang Z. Assessing the toxicity *in vitro* of degradation products from deoxynivalenol photocatalytic degradation by using upconversion nanoparticles@TiO_2 composite // Chemosphere. 2020. Vol. 238. P. 124648. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124648.

71. Zhu F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products // Food Chemistry. 2018. Vol. 264. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.05.047.

UDC 636.085.65;664.727

Bakhchevnikov O. N., Braginets A. V.

OZONATION FOR FEED RAW MATERIALS DISINFECTION (REVIEW)

Summary. *The issues of disinfection of raw materials for feed production by the method of ozonation were considered in the review. Ozonation could be a universal method of plant raw materials disinfection in agricultural enterprises and formula-feed plants. A research objective is to generalize and analyze scientific publications devoted to the feed raw materials disinfection by ozone, as well as to clarify information on rational parameters of such type of disinfection and its effect on the quality of feed. Moreover, we assessed the possibility of further use of ozonation in the production process. For the research of the subject, we searched and selected scientific articles published from 2005 to 2020 and conducted a systematic review. Ozonation was found to be an effective method for feed decontamination that destroys pathogenic bacteria and fungi. This method is also used to detoxify feed and control pest insects. Ozonation is not yet widely used in agricultural production and formula-feed industry to ensure the biological safety of feed raw materials. Additional research aimed at improving the efficiency of ozonation by standardization of parameters for its implementation to ensure the broadest possible application of the method under study should be carried out. The development of technical solutions that increase the diffusion of gaseous ozone will significantly increase the safety and preservation of raw materials. Rational values of ozone concentration, processing*

time, etc., for each type of raw materials, as well as for mycotoxins, pesticides, microorganisms and insects, including different stages of their growth and development, should be defined. Special attention should be also focused on the study of the complex efficiency of ozonation concerning several pathogenic factors.

Keywords: *feed, raw materials, ozone, ozonation, disinfection, detoxification, mycotoxins, decontamination, disinsection.*

Бахчевников Олег Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»; 347740, Россия, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: oleg-b@list.ru.

Брагинец Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»; 347740, Россия, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: Al.55552015@yandex.ru.

Bakhchevnikov Oleg Nikolayevich, Cand. Sc. (Tech.), researcher of the Department of vegetable feedstock processing, SSE “Agricultural research center «Donskoy»”; 14, Lenina str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: oleg-b@list.ru.

Braginets Andrey Valeryevich, Cand. Sc. (Tech.), junior researcher of the Department of vegetable feedstock processing, SSE “Agricultural research center «Donskoy»”; 14, Lenina str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: Al.55552015@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 20.01.2020.
Дата принятия к печати – 01.03.2020.