НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.8

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ АФЛАТОКСИНОВ В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ

[1]Бурак Л.Ч., [1]Сапач А.Н., [2]Саманкова Н.В.

[1]ООО «БЕЛРОСАКВА», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, alexander@belrosakva.by;
[2]Белорусский государственный экономический университет, Минск, e-mail: samankova@list.ru

Афлатоксины, токсичные вторичные метаболиты, вырабатываемые видами *Aspergillus spp*, представляют значительный риск для здоровья из-за их канцерогенных, тератогенных и мутагенных свойств. Цель исследования – обзор и анализ современных физических, химических и биологических методов обработки пищевых продуктов, с целью дезактивации афлатоксинов. В обзор включены статьи на английском и русском языках. Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по данной теме проводили в библиографических базах Scopus, Web of Science и PubMed. Для отбора научных статей на русском языке провели поиск по ключевым словам в «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период с 2014 по 2024 г. Физические методы, такие как микроволновое нагревание, гамма- и электронно-лучевое облучение, импульсный свет и ультрафиолетовая обработка, показали свою эффективность по снижению уровня загрязнения афлатоксинами продуктов питания, однако точные механизмы действия и их влияние на различные пищевые матрицы требуют дальнейшего изучения. Химические методы, включая использование озона, натуральных растительных экстрактов и органических кислот, также эффективны за счет реактивных свойств этих агентов для нейтрализации афлатоксинов. Однако медленное проникновение этих агентов в более глубокие слои загрязненных пищевых продуктов создает ограничение по их использованию. Пробиотические бактерии и дрожжи продемонстрировали потенциал в связывании и снижении биодоступности афлатоксинов, особенно афлатоксина B_1, как в исследованиях in vitro, так и in vivo. Важнейшим аспектом развития этих технологий является интеграция интеллектуальной упаковки и искусственного интеллекта. Несмотря на значительный прогресс в разработке методов инактивации афлатоксинов, остаются проблемы в оптимизации этих методов для различных видов пищевого сырья, продуктов питания и обеспечения их безопасности и эффективности.

Ключевые слова: афлатоксины, дезактивация, эффективность, микроволновой нагрев, облучение, импульсный свет, озон, растительный экстракт, органические кислоты, атоксигенные штаммы

MODERN METHODS OF DEACTIVATION OF AFLATOXINS IN FOOD PRODUCTS

[1]Burak L.Ch., [1]Sapach A.N., [2]Samankova N.V.

[1]LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, alexander@belrosakva.by;
[2]Belarusian State Economic University, Minsk, e-mail: samankova@list.ru

Aflatoxins, toxic secondary metabolites produced by *Aspergillus spp*, pose a significant health risk due to their carcinogenic, teratogenic and mutagenic properties. The aim of the study was to review and analyze modern physical, chemical and biological methods of food processing for the deactivation of aflatoxins. The review included articles in English and Russian. A search for foreign scientific literature in English on this topic was conducted in the bibliographic databases Scopus, Web of Science and PubMed. To select scientific articles in Russian, a keyword search was conducted in the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU. The period 2014–2024 was adopted as the time frame for the review of scientific publications. Physical methods such as microwave heating, gamma and electron beam irradiation, pulsed light and ultraviolet treatment have been shown to be effective in reducing aflatoxin contamination in foods, however, the exact mechanisms of action and their effects on different food matrices require further investigation. Chemical methods including the use of ozone, natural plant extracts and organic acids are also effective due to the reactive properties of these agents in neutralizing aflatoxins. However, the slow penetration of these agents into the deeper layers of contaminated food products limits their use. Probiotic bacteria and yeasts have shown potential in binding and reducing the bioavailability of aflatoxins, especially aflatoxin B1, in both in vitro and in vivo studies. A critical aspect of the development of these technologies is the integration of smart packaging and artificial intelligence. Despite significant progress in the development of aflatoxin inactivation methods, challenges remain in optimizing these methods for different types of food raw materials, food products and ensuring their safety and efficacy.

Keywords: aflatoxins, deactivation, efficiency, microwave heating, irradiation, pulsed light, ozone, plant extract, organic acids, atoxigenic strains

Введение

За последнее десятилетие продукты питания, загрязненные микотоксинами, стали критической проблемой для глобальной безопасности пищевых продуктов. Афлатоксины – вторичные метаболиты, вырабатываемые грибами видов *Aspergillus flavus* и *Aspergillus parasticus*. Эти грибы могут загрязнять пищевые продукты в цепочке сельскохозяйственного производства при наличии благоприятных условий для их роста. Афлатоксины существуют в четырех

различных формах: B_1 (AFB_1), B_2 (AFB_2), G_1 (AFG_1) и G_2 (AFG_2) [1]. Афлатоксины (AF) загрязняют различные пищевые продукты, такие как злаки, орехи и специи, нанося вред здоровью человека и животных. Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицировало афлатоксин B_1 как канцерогенное вещество группы 1 [2]. Как правило, воздействие афлатоксинов может иметь несколько симптомов, которые зависят от концентрации, продолжительности воздействия, возраста, пола и состояния здоровья человека. Так, например, отмечено, что мужчины более восприимчивы, чем женщины [3]. Афлатоксины, присутствующие в пищевой цепи, вызывают значительные экономические потери, особенно в развивающихся странах, и эти потери являются бременем для всех заинтересованных сторон по всей пищевой цепи. Глобальные потери, вызванные афлатоксинами, оцениваются приблизительно в 1,2 млрд долларов США. Экономические потери и медицинские последствия афлатоксинов требуют действенных и эффективных методов дезактивации, которые снизили бы содержание афлатоксинов в пищевых продуктах до приемлемого уровня. Снижение содержания или максимальная деградация афлатоксинов в пищевых продуктах является основной задачей для предотвращения негативного влияния на здоровье потребителей. В цепочке переработки пищевых продуктов доступны различные способы обеззараживания афлатоксинов, такие как физические, химические и биологические методы. Физические методы обеззараживания включают подходы, основанные на передовых технологиях окисления, таких как микроволны [4], импульсное электрическое поле [5] и холодная плазма [6], которые позволяют быстро обезвреживать афлатоксины и сортировку, практикуемую в случае сильно загрязненного зерна [7]. Химический метод включает использование органических кислот, озона, адсорбентов, электролизованной окисленной воды и натуральных растительных экстрактов, которые во многих регионах приняты в качестве безопасных и допущенных к применению [8]. Биологическая дезактивация основана на использовании микроорганизмов и ферментов для дезактивации и преобразования афлатоксинов в нетоксичные или менее токсичные метаболиты, пример *Trichoderma* spp., который реагирует в форме микопаразитизма, конкуренции и антибиоза [9]. Атоксигенные штаммы *Aspergillus* реагируют конкурентно против токсигенных штаммов, а также использования бактерий и дрожжей. **Цель исследования** – обзор и анализ современных физических, химических и биологических методов обработки пищевых продуктов, с целью деконтаминации афлатоксинов в пищевых продуктах и их влияния на контроль концентрации афлатоксинов в пищевых продуктах.

Материалы и методы исследования

В обзор включены статьи на английском и русском языках. Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по данной теме проводили в библиографических базах Scopus, Web of Science и PubMed. 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. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период с 2014 по 2024 г. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по конкретным аспектам исследуемой темы. Для поисковых запросов в зарубежных базах данных Scopus, Web of Science, PubMed были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: aflatoxins, deactivation, efficiency, microwave heating, irradiation, pulsed light, ozone, plant extract, organic acids, atoxigenic strains.

Критерии включения:

(1) Статья написана в период с 2014 по 2024 год.

(2) Статья соответствует теме исследования.

(3) Типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи и обзорные статьи.

Критерии исключения:

(1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики современных физических, химических и биологических методов обработки и их влияния на снижение или деградацию афлатоксинов в пищевых продуктах.

(2) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Физические способы дезактивации афлатоксинов в пищевых продуктах

Многие из традиционных методов, используемых для борьбы с загрязнением афлатоксинами, включают в себя основные физические процессы, такие как сортировка, просеивание, веяние и термическая обработка [10]. Чувствительность афлатоксинов к теплу зависит от условий окружающей среды и влажности продукта. Влага в пище вызывает гидролиз лактонного кольца, что приводит к его раскрытию и превращению афлатоксинов в нетоксичные соединения [11]. Афлатоксины разлагаются при высоких температурах (237–306 °C), которые обычно достигаются на этапе дезодорации пищевых масел. Низкое содержание влаги в растительном масле на данном этапе препятствует полной дезактивации афлатоксинов [12]. Для снижения негативного влияния на здоровье потребителей необходимо разрабатывать и внедрять новые методы дезактивации. Новые технологии могут дезактивировать пищевые продукты от афлатоксинов при условии, что они устойчивы, эффективны и оказывают минимальное влияние на питательную ценность и качество пищевого продукта. Для повышения эффективности дезактивации иногда также целесообразно комбинировать два или более методов.

1.1. Дезактивация афлатоксинов методом микроволнового нагрева

Микроволны представляют собой электромагнитное излучение с частотой от 0,3 до 300 ГГц с длинами волн от 1 мм до 1 м.

Таблица 1

Результаты эффективности микроволнового воздействия по дезактивации афлатоксинов в пищевых продуктах

Продукт	Параметры обработки	Эффективность дезактивации	Основные результаты / влияние на качество продукта	Источник
Вода	Микроволновое облучение, температура: 100, 120, 130 и 140°C, мощность: 500 Вт	50-21,6%	Начальная концентрация $АФБ_1$ влияет на эффективность дезактивации. Эффективность дезактивации снижалась с увеличением концентрации афлатоксинов, а расстояние между молекулами реагентов уменьшалось	[17]
Кукурузная мука	Высокая частота выходного сигнала 2450 МГц при 50% и 100% для временных интервалов 2, 4, 5, 6, 8 и 10 мин.	Обеззараживание является функцией времени экспозиции и настройки мощности	Наблюдались некоторые изменения внешнего вида муки	[13]
Искусственно заражённый арахис	Маломощный нагрев 360, 480 и 600 Вт	59–67%	Качественные показатели: влажность, твердость, цвет, перекисное число и свободные жирные кислот ы не изменились	[4]
Зёрна кукурузы	300 Вт/50, 55 и 60 мин. при постоянной температуре 60 °C	85%	Физико-химические свойства сохраняются, при увеличении мощности до 700 Вт *Aspergillus flavus* и *Aspergillus parasiticus* дезактивируются	[15] [18]
Фисташки	100% выходной мощности частоты 2450 МГц и 1,0 кВт/время 6 и 10 мин.	72,5 ± 2,5%	Физико-химические свойства не были затронуты, искусственно загрязненный образец показал более высокую степень дезактивации по сравнению с естественно загрязненными образцами из-за ассоциации или связывания афлатоксинов с компонентами пищи, такими как белки, углеводы и жиры	[19]
Различные пищевые продукты (кукуруза, арахис) и модельная система	Микроволны, индуцированные на разных уровнях при 60 МГц, мощность 1650 Вт, в течение 5,5 мин.	Скорость разрушения афлатоксина увеличивалась с увеличением мощности микроволновой печи и времени	Было отмечено, что воздействие микроволн высокой интенсивности приводит к незначительной потере питательных веществ в арахисе и кукурузе	[20]

Микроволновая технология имеет множество применений, таких как связь, навигация, радиолокация и отопление. О возможности использовании микроволнового нагрева пищевых продуктов стало известно с 1945 г., когда американский инженер П. Спенсер изобрел первую микроволновую печь. Микроволновая обработка позволяет значительно интенсифицировать технологические процессы производства пищевых производств, связанные с нагревом и сушкой продукции. Микроволны функционируют, взаимодействуя с полярными молекулами воды и заряженными ионами. Трение возникает за счет выравнивания полярных молекул и движения заряженных ионов в быстром переменном магнитном поле, которое является результатом этого взаимодействия. Эти производимые объемные нагревания отличают микроволновый нагрев от других методов поверхностной сушки. Это дало преимущества с точки зрения быстрого нагрева и относительно высокой эффективности сушки. Результаты некоторых научных исследований эффективности микроволнового нагрева для снижения афлатоксинов представлены в таблице 1. В исследовании модельной системы, когда афлатоксины были нанесены на силикагель, в кукурузу и арахис, обработанные в микроволновой печи, было установлено, что снижение содержания афлатоксинов с помощью микроволн зависит от мощности микроволн, времени обработки и температуры нагрева [13]. Комбинированная обработка облучением 5 кГр и 2 мин. микроволнами оказалась эффективной при дезактивации афлатоксинов в фисташках, а органолептические показатели качества продукта не проявили существенной разницы между контролем и обработанными образцами [14]. Основным недостатком термического метода дезактивации афлатоксинов является негативное влияние на пищевую ценность обрабатываемых продуктов и ухудшение их качественных показателей [15; 16].

1.2. Дезактивация афлатоксинов с помощью радиации

Радиацию можно классифицировать как ионизирующую в случае рентгеновских лучей, ультрафиолетовых лучей, гамма-лучей и электронных пучков, и неионизирующую в случае микроволновых лучей, видимых лучей, радиоволн и инфракрасного излучения. В ходе исследований установлена эффективность использования ультрафиолетовых лучей и гамма-излучения для дезактивации афлатоксинов. С целью потенциального применения для дезактивации токсинов в настоящее время научное сообщество активно изучает использование новых технологий, таких как импульсный свет и облучение электронным пучком [21]. Обеззараживание афлатоксина B_1 с помощью гамма-облучения вызывает такие процессы, как реакция свободных радикалов из-за радиолиза воды и других компонентов, поэтому афлатоксин B_1 можно рассматривать как устойчивый к гамма-облучению. В исследовании, проведенном на образцах кукурузы, были протестированы дозы облучения 2, 6 и 10 кГр, при этом доза 6 кГр была выбрана как наилучшая, поскольку она эффективно снижала афлатоксины в среднем на 89,58% [22]. Хотя гамма-облучение может полностью обеззараживать афлатоксины в пище, себестоимость гамма-облученных продуктов питания по-прежнему остается высокой. Кроме того, время облучения довольно велико; образец должен подвергаться воздействию радиации в течение примерно 23 часов, чтобы достичь максимальной дезактивации.

Ввиду недостатков гамма-лучей вместо них использовалось облучение электронным пучком (EBI). EBI – это передовая и новая технология, в которой электронный пучок генерируется машиной с использованием линейных ускорителей. Применение EBI для дезактивации афлатоксинов показало свою эффективность за счет короткого времени обработки, незначительного расхода теплоэнергии, низкой стоимости оборудования и возможности контролировать дозу облучения [23]. Ультрафиолетовые (УФ) лучи имеют длину волны от 10 до 4000 нм. Их подразделяют на три категории: УФ-А (315–400 нм), УФ-В (280–315 нм) и УФ-С (100–280 нм). Как правило, афлатоксины поглощают УФ-излучение при 222, 265 и 362 нм, причем наибольшее поглощение происходит при 362 нм из-за двойной связи C8–C9 на терминальном фурановом кольце [24]. Было обнаружено, что длина волны светодиодного УФ-излучения 278 нм, энергия облучения 100% в течение 10 минут снижает афлатоксины более чем на 80%, механизм, лежащий в основе, включает разрушение структуры ненасыщенного кетона в AFB_1 , B_2 и G_1 [25]. В ходе проведения дальнейших исследований целесообразно идентифицировать изменения и механизм их действия, которые дополнительно проясняют потенциальные продукты реакции для афлатоксина B_1. Короткая длина волны, слабая проникающая способность и неспособность дезактивировать афлатоксины из загрязненных продуктов питания являются некоторыми из недостатков использования УФ-обработки. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований, в ходе которых необходимо

установить наиболее приемлемый диапазон длин волн, с целью максимальной дезактивации афлатоксинов.

Технология импульсного света, как современная нетермическая технология, также продемонстрировала свою эффективность при дезактивации афлатоксинов [17; 26]. Было установлено, что интенсивные кратковременные вспышки, высокая пиковая мощность и возможность регулировать как длительность импульса, так и частоту выходного сигнала ламп-вспышек увеличивают скорость дезактивации афлатоксинов. При этом рис, обработанный в течение 80 с импульсным светом 0,52 Дж*см$^{-2}$*импульс$^{-1}$, показал снижение содержания афлатоксинов на 75%, в то время как в рисовых отрубях, обработанных в течение 15 с, снижение AFB_1 составило 90,3% и 86,7% соответственно [27]. Для повышения эффективности использования технологии импульсного света необходимо проведение дальнейших исследований для различных пищевых продуктов и растительного сырья с целью оптимизации параметров обработки.

2. Химические методы дезактивации афлатоксинов

2.1. Озонирование

Озон – это трехатомный кислород, образующийся при высоком энергетическом воздействии на кислород. В природе источником энергии служат ультрафиолетовое излучение и разряд молнии, но в промышленном производстве для генерации озона обычно используются ультрафиолетовое облучение и коронный разряд. Многочисленные исследования подтверждают, что озон, или озонирование, является эффективным методом дезактивации афлатоксинов в пищевой промышленности, при этом применялись три способа озонирования: сухой газообразный озон, влажный газообразный озон, иногда называемый туманным озоном, и озонированная вода [28]. Озон является эффективным способом дезактивации афлатоксинов из-за его способности электрофильно атаковать двойную связь C8–C9 фуранового кольца. Эта атака приводит к образованию первичных озонидных соединений, которые затем перегруппировываются в менее токсичные производные монозонида, такие как альдегид, кетон и органические кислоты.

Основные последствия, которые произошли с качеством пищевых продуктов после применения озона, остаются проблемой для многих исследователей пищевых продуктов, поскольку озонирование может влиять на качество продуктов многими способами, такими как содействие окислению или деградации потенциальных химических компонентов, таких как модификация крахмала и белка, наблюдавшаяся в нескольких исследованиях [28].

Таблица 2

Результаты научных исследований дезактивация AFB_1 в различных пищевых продуктах озонированием

Наименование продукта	Параметры обработки	Результаты обработки и выводы	Источник
Кукурузная мука	90 мг*л$^{-1}$ в течение 20 и 40 мин.	78–88%. Способность афлатоксинов вызывать апоптоз снижена	[18]
Кукурузная крупа	60 мг*л$^{-1}$ в течение 480 мин.	57,0%. Площадь поверхности была большой, что требовало высокой концентрации озона для повышения эффективности дезактивации	[29]
Арахис	3, 5 и 7 мг*л$^{-1}$ в течение 10, 20, 30 и 60 мин.	67,24 и 79,01% при максимальной концентрации и времени. При использовании УФ-излучения питательная ценность арахиса остается неизменной	[30]
Молоко	6,0 мг*л$^{-1}$ в течение 30 мин.	Полная дезактивация производных в молоке. При использовании УФ-излучения и импульсного электрического поля синергетические эффекты не приводят к значительному снижению количества *Lactobacillus acidophilus* в конечном продукте	[31]
Мясные фрикадельки (Ланча и Кофта) Египет	20–40 частей на миллион	11,6–55,2% для ланча и кофты соответственно, но при высокой концентрации 54,6–85,7% и 61,4–78,4%. Обработанное сырое и готовое к употреблению мясо с незначительными изменениями физико-химических свойств	[32]
Кукурузная крупа	20–60 мг*л^{1} за интервал времени от 120 до 480 мин.	30–57%. Необходимо провести определения потенциального взаимодействия соединения, образующегося при дезактивации афлатоксинов, с пищевой матрицей с точки зрения безопасности	[33]

Кроме того, температура, относительная влажность, содержание влаги в пищевых продуктах, концентрация озона и продолжительность воздействия влияют на процесс озонирования. Также в научном сообществе высказываются опасения по поводу безопасности озонированных пищевых продуктов [28]. Результаты некоторых исследований дезактивации афлатоксинов методом озонирования представлены в таблице 2.

2.2. Органические кислоты и натуральные растительные экстракты

Для дезактивации афлатоксинов в различных пищевых продуктах обычно используются три пищевые органические кислоты: лимонная, молочная и пропионовая. Механизм дезактивации включает концентрацию органических кислот, которые преобразуют афлатоксины, присутствующие в пище, в менее токсичное соединение, такое как афлатоксин D_1 (AFD_1), посредством восстановления двойной связи лактонного кольца в кумариновом фрагменте с последующим гидролизом сложноэфирной связи и, наконец, дезкарбоксилированием, которое дает AFD_1 [7]. Лимонная кислота в настоящее время считается безопасной пищевой добавкой, которая эффективно удаляет афлатоксины из пищи. Так, например, она снижала афлатоксины в сильно загрязненной кукурузе на 96,7% [21]. Исследования также показали, что пропионовая кислота в концентрации 0,25–1% дезактивирует афлатоксины в искусственно загрязненной кукурузе и арахисе [21]. Было обнаружено, что молочная кислота гидролизует двойную связь дифуранового кольца в AFB_1, что приводит к образованию AFB1-8-гидрокси из-за электронного дефицита в карбонильном атоме углерода, благоприятствующего нуклеофильной атаке, которая обеспечивает движущую силу для гидролиза лактонной части AFB_1 до менее токсичного соединения [34]. Хотя большинство из отмеченных органических кислот не оказывают отрицательного воздействия на качество и пищевую ценность продукта, необходимы дальнейшие исследования, чтобы максимально подтвердить эффективность и отсутствие ограничений.

Исследования показали, что лекарственные растения с антимикробным потенциалом также могут оказывать дезактивирующее действие на продукты питания, загрязненные афлатоксинами [35]. Было установлено, что несколько биоактивных соединений, обнаруженных в травянистых растениях *Hybanthus emespermus, Eclipta Prostrata* и *Centella Asiatica*, обладают способностью дезактивировать афлатоксины [8]. Механизм дезактивации включает в себя возможность биоактивных соединений, таких как линалоол и борнилацетат, реагировать с лактонным кольцом афлатоксинов, что приводит к образованию менее токсичных соединений [7; 8]. Исследование также показало, что использование экстракта листьев *Vosaka (Adhatodavasica Nees)* дезактивирует AFB_1 примерно на ≥98% после инкубации в течение 24 часов при температуре 37 °C [36]. Согласно исследованию, эфирные масла *Lippia javanica*, *Ocimum gratissimum*, *Satureja punctata* и *Toddalia asiatica* являются действенными фунгицидами для подавления роста *A. flavus* и *A. parasiticus* и контроля выработки афлатоксинов. Анализ биоактивного потенциала растительного экстракта *Diospyros Capricornuta F* показал, что 2-4-дитрет-бутилфенол был распространенным соединением в экстрактах, которое показало значительный потенциал при концентрации 62,5, 125,0 и 250,0 мкг*мл $^{-1}$, способный ограничить более 99 и 94% выработки афлатоксинов *Aspergillus flavus* и *Aspergillus parasticus* [37]. Поскольку растительные экстракты ингибируют афлатоксины в низких концентрациях, их дальнейшее использование для дезактивации афлатоксинов, по-видимому, безопасно как для человека, так и для окружающей среды. Однако необходимы дополнительные исследования, чтобы определить сложность составов растительных экстрактов и приемлемость продуктов для потребителей.

3. Биологическая дезактивация

Значительные достижения в области бактериальной генетики, кодирования белков и биоинформатики сформировали наше современное понимание того, как различные факторы взаимодействуют для борьбы с афлатоксинами [7; 38]. Биологический контроль считается одним из наиболее перспективных решений для борьбы с ростом *Aspergillus spp*. в процессе роста и созревания. Антибиоз включает в себя выработку ингибирующих метаболитов и ферментов, которые подавляют пролиферацию *Aspergillus spp*. В этом методе использовались различные виды, такие как атоксигенные штаммы и *Trichoderma spp*., бактерии и дрожжи также показали антагонистическую и снижающую афлатоксины активность [39]. Микробные летучие органические соединения (ЛОС), выделяемые бактериями, дрожжами и нитчатыми грибами, использовались для дезактивации афлатоксинов. В ходе исследований неоднократно установлено, что ЛОС являются эффективной альтернативой синтетическим фунгицидам, кроме того, ЛОС просты в приме-

нении и оказывают незначительное воздействие на окружающую среду [40].

3.1. Trichoderma spp

Trichoderma spp. являются одними из наиболее распространенных агентов биологического контроля, используемых во всем мире. Они присутствуют в почвенной и корневой экосистеме и проявляют свою активность биологического контроля в отношении широкого спектра патогенов растений посредством микопаразитизма, конкуренции и антибиоза [9]. Механизм его действия заключается в снижении роста *Aspergillus*, в то время как впоследствии может происходить выработка афлатоксинов или, возможно, деградация афлатоксинов, а не ингибирование их синтеза [9]. Установлено, что фермент, продуцируемый *Trichoderma spp*., является пероксидазой, которая разрушает внеклеточную клеточную стенку и ингибирует рост гиф, в то время как второй фермент протеаза P6281 проявила ингибирующую активность в отношении прорастания конидий и роста мицелия [41]. В настоящее время триходерма продается как активный ингредиент во многих продуктах по всему миру, включая биоудобрения, стимуляторы естественной резистентности и биопестициды. Было установлено, что *Trichoderma harzianum* и *T. viridae* эффективны в обеззараживании афлатоксинов, причем первый способен удалять более 80% афлатоксинов из пищевых продуктов, в то время как последние два вида, *T . longibrachiatum* и *T . auroviride*, способны удалять только 50% афлатоксинов из пищевых продуктов, выращенных в теплице [42]. Результаты исследования показали, что *Trichoderma spp*. может обеззараживать афлатоксины в арахисе и сладкой кукурузе до 57% и 65% соответственно.

3.2. Атоксигенные штаммы Aspergillus

Атоксигенные штаммы *Aspergillus* способны подавлять рост токсигенных грибов посредством конкурентного исключения и снижать выработку афлатоксинов. Атоксигенные *Aspergillus* не способны вырабатывать афлатоксины из-за частичной или полной делеции в кластере генов биосинтеза афлатоксинов или отсутствия генов поликетидсинтазы или генетической мутации. Поэтому, когда атоксигенные штаммы *Aspergillus* применяются в полевых условиях, они могут вытеснять токсигенные штаммы и значительно снижать как уровень заражения, так и выработку афлатоксинов *Aspergillus*, которые содержатся в продукте. На сегодняшний день на мировом рынке присутствуют некоторые продукты на основе одного или комбинации атоксигенных штаммов, таких как *Aspergillus flavus* AF 36, произведенный в США, который был разработан USDA-ARS, и Afla Guard (A. flavus NRRL21882, 18543 и 30797), разработанный Syngenta. Еще один эффективный продукт – Aflasafe, разработанный USDA-ARS, IITA и M&B Gates Foundation. Он состоит из четырех атоксигенных изолятов, принадлежащих к различным вегетативно совместимым группам [43]. Следует отметить, что, несмотря на высокий уровень эффективности, доказанный в нескольких полевых испытаниях, существуют опасения относительно использования данных агентов биологического контроля. Отсутствуют данные по нескольким аспектам, таким как жизнеспособность и динамика популяции в воде, отложениях, их стойкость и размножение в естественной среде. Несколько исследований указывают, что атоксигенные штаммы могут сохраняться из года в год и снижать загрязнение афлатоксинами, даже если они не применяются. Этот вопрос требует дополнительных исследований для проверки безопасности применения атоксигенных штаммов *Aspergillus.*

3.3. Бактерии и дрожжи

Было доказано, что некоторые бактерии и дрожжи посредством конкуренции и антибиоза обладают ингибирующей активностью в отношении *Aspergillus spp*. Бактерии и дрожжи подавляют рост мицелия, прорастание конидий и выработку афлатоксинов. В настоящее время идентифицирован широкий спектр ингибирующих соединений, таких как ферменты (протеаза, глюканазы и хитиназа), пептиды, органические кислоты (молочная кислота и жирные кислоты) и различные алициловые и ароматические соединения [44]. Различные роды дрожжей *Saccharomyces* и не *Saccharomyces,* такие как S*accharomyces*, *Aureobasidium, Pichia, Metschnikovia, Dakkera* и *Rhodotorula*, были изучены в биоконтроле, особенно в контроле афлатоксинов в винограде [44]. Бактериальные виды, такие как *Lactobacilli, Streptomyces, Bacillus, Stenotrophomonas, Burkholderia, Ralstoni*a и *Pseudomonas*, продемонстрировали хороший деконтаминационный потенциал. Полезность бактерий и дрожжей в разных странах все еще нуждается в дальнейшем исследовании.

Основными проблемами биологического метода являются штаммы, используемые в процессе, и их воздействие на экосистему, а также правовые нормы, которые необходимо соблюдать, прежде чем метод может быть одобрен для использования в производстве продуктов питания.

4. Умная упаковка для борьбы с грибками и афлатоксинами в продуктах питания

Быстрорастущее потребление упакованных продуктов питания и напитков привело к инновационным системам упаковки из-за увеличения сложности продукта, глобализации рынка продуктов питания и потребностей потребителей в экологически чистой упаковке [45]. В результате на мировом рынке появились умная упаковка, активная упаковка и интеллектуальная упаковка со своими приложениями. Умные упаковочные системы широко используются в продуктах питания и напитках, товарах медицинского назначения, средствах личной гигиены и т.д. Они могут отслеживать физико-химические воздействия, такие как условия окружающей среды, а также предотвращать микробиологические изменения. Характеристики упаковки диктуются продуктом, который необходимо сохранить. Такие материалы, как картон, бумага, пластик, стекло, металл и другие материалы, были синергически объединены с технологией активной упаковки, чтобы обеспечить полезное взаимодействие между упаковкой и внутренней средой, контролируя образование афлатоксинов в пищевых продуктах и обеспечивая активную защиту [46]. Улучшенные механические, термические и барьерные свойства биоразлагаемых покрытий и пленок были применены к возобновляемому содержимому биомассы для снижения потерь и загрязнения продуктов питания. Они обеспечивают хорошие барьерные свойства против грибков, продуцирующих афлатоксины. Эта технология (сообщение об изменении продуктов питания внутри упаковки) недавно была внедрена и применена в зерновых культурах, фруктах, хлебобулочных изделиях, орехах и молочных продуктах для контроля афлатоксинов [46]. Все это произошло в результате интеллектуальной, пассивной и экологически чистой природы традиционных упаковочных систем [47]. Включение биополимерных пленок и антимикробных агентов в покрытия показало большой потенциал в борьбе с распространенными грибками и афлатоксинами, в конечном итоге улучшило качество продуктов питания [47]. Благодаря своей повышенной эффективности против роста плесени и обеззараживания афлатоксинов, эфирные масла и органические кислоты получили больше научного внимания в индустрии умной упаковки в дополнение к полипептидам, хитозану и натамицину [46; 47]. Герметичные пакеты создают измененную атмосферу, которая подавляет рост грибков и, следовательно, контролирует выработку афлатоксинов. С другой стороны, пакеты Purdue Improved Crop Storage (PICS) продемонстрировали сопоставимую эффективность в снижении афлатоксинов при хранении кукурузы в Гане; количество афлатоксинов было ниже рекомендуемого безопасного порогового значения 15 ppb [48]. Кроме того, афлатоксины были снижены до 3 нг*г$^{-1}$ при применении умной упаковки в хлебопекарной промышленности. Когда концентрация, pH и время инкубации интеллектуального электрохимического иммуносенсора AFB_1 в вине были оптимизированы, BN действовал как электроактивный материал, который увеличивал электропроводность иммуносенсора. Иммуносенсор показал более широкий линейный диапазон 1–10 нг ML^{-1} , низкий предел обнаружения (0,834 ML^{-1}) и был стабилен в течение 3 недель при обнаружении AFB_1 в упакованном вине [49].

Хотя достижения нанотехнологий в области противогрибковой упаковки и методов дезактивации афлатоксинов являются эффективными, вопросы безопасности и регулирования остаются нерешенными. Основная проблема с некоторыми активными упаковочными материалами, такими как антиоксиданты, заключается в том, что они чувствительны к теплу, воздуху и свету. На процесс их экстракции и технологию производства упаковки влияет их температурная чувствительность. В результате могут использоваться нетрадиционные методы экстракции, такие как экстракция без растворителя, экстракция жидкостью под давлением, экстракция под высоким давлением и температурой, экстракция с помощью импульсного электрического поля, экстракция с помощью ультразвука и экстракция с помощью сверхкритического углерода.

В последние годы пищевая промышленность использовала небольшую автоматизированную систему машинного обучения (МО) для создания портативных устройств, которые можно использовать неразрушающим образом и в режиме реального времени для выявления пищевых продуктов, загрязненных афлатоксинами на ранних стадиях сбора и переработки, что упрощает обеззараживание афлатоксинов [7; 16]. С учетом оценки потенциальных рисков в Нидерландах была создана программа мониторинга афлатоксинов на основе алгоритма машинного обучения (подмножество ИИ) для пищевой промышленности, которая использовала данные около 5605 зарегистрированных случаев афлатоксинов в 2005–2018 годах [50]. Ин-

струмент искусственного интеллекта для обнаружения штаммов и ферментов, которые дезактивируют афлатоксины в пищевых продуктах, был исследован на основе биологических организмов путем обнаружения важных клеточных процессов, которые способствуют дезактивации афлатоксинов в пищевых продуктах [7; 21].

Заключение

Афлатоксины, токсичные вторичные метаболиты, вырабатываемые видами *Aspergillus spp,* представляют значительный риск для здоровья из-за их канцерогенных, тератогенных и мутагенных свойств. Идентификация и количественное определение афлатоксинов в пищевых продуктах является серьезной проблемой для обеспечения безопасности пищевых продуктов. К сожалению, полностью предотвратить загрязнение пищевых продуктов афлатоксинами, даже при принятии необходимых программ и процедур на основе систем управления продуктами питания на надлежащих этапах до и после сбора урожая и обработки, не представляется возможным. Низкая эффективность отдельных традиционных, химических и биологических методов дезактивации требует исследования проактивных решений для быстрого контроля, снижения и удаления афлатоксинов в пищевых продуктах. Поэтому крайне важно создать новые, высокоэффективные методы идентификации, измерения и контроля производства афлатоксинов в пищевых продуктах. Важнейшим аспектом развития этих технологий является интеграция интеллектуальной упаковки и искусственного интеллекта. Умная упаковка может обеспечить мониторинг в реальном времени и индикаторы присутствия афлатоксина, в то время как искусственный интеллект способен повысить точность обнаружения и оптимизацию процесса, что приведет к более эффективным и адаптируемым стратегиям дезактивации. Несмотря на значительный прогресс в разработке методов инактивации афлатоксинов, остаются проблемы в оптимизации этих методов для различных видов пищевого сырья, продуктов питания и обеспечении их безопасности и эффективности.

Список литературы

1. Abdolmaleki K., Javanmardi F., Gavahian M., Phimolsiripol Y., Ruksiriwanich W., Mir S.A. Emerging technologies in combination with probiotics for aflatoxins removal: An updated review // International Journal of Food Science & Technology. 2022. Vol. 57. No. 9. P. 5712-5721. DOI: 10.1111/ijfs.15926.

2. Bhardwaj K., Meneely J.P., Haughey S.A. Risk assessments for the dietary intake aflatoxins in food: A systematic review (2016–2022) // Food Control. 2023. Vol. 149. P. 109687. DOI: 10.1016/j.foodcont.2023.109687.

3. Kinyenje E., Kishimba R., Mohamed M., Mwafulango A., Eliakimu E., Kwesigabo G. Aflatoxicosis outbreak and its associated factors in Kiteto, Chemba and Kondoa districts, Tanzania // PLOS Global Public Health. 2023. Vol. 3. P. e0002191. DOI: 10.1371/journal.pgph.0002191.

4. Patil H., Shah N.G., Hajare S.N., Gautam S., Kumar G. Combination of microwave and gamma irradiation for reduction of aflatoxin B1 and microbiological contamination in peanuts (Arachis hypogaea L.) // World Mycotoxin Journal. 2019. Vol. 12. P. 269–280. DOI: 10.3920/WMJ2018.2384.

5. Bulut N., Atmaca B., Akdemir Evrendilek G., Uzuner S. Potential of pulsed electric field to control Aspergillus parasiticus, aflatoxin and mutagenicity levels: sesame seed quality // Journal of Food Safety. 2020. Vol. 40. P. e12855. DOI: 10.1111/jfs.12855.

6. Бурак Л. Ч., Сапач А.Н., Завалей А.П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14, № 2(49). С. 173-183. DOI: 10.21285/achb.914.

7. Бурак Л.Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодоовощного сырья и соковой продукции. М.: ИНФРА-М, 2025. 236 с. DOI: 10.12737/0.12737/2154991.

8. Al-Owaisi A., Al-Sadi A.M., Al-Sabahi J.N. In vitro detoxification of aflatoxin B1 by aqueous extracts of medicinal herbs // All Life. 2022. Vol. 15. P. 314–324. DOI: 10.1080/26895293.2022.2049900.

9. Guzmán-Guzmán P., Kumar A., De los Santos-Villalobos S. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases – a review // Plants. 2023. Vol. 12. P. 1–35. DOI: 10.3390/plants12030432.

10. Mshanga J.P., Makule E.E., Ngure F.M. Physical methods for reduction of aflatoxins exposure in groundnuts in some low-income countries: A review // Current Research in Nutrition and Food Science. 2023. Vol. 11. P. 504–518. DOI: 10.12944/CRNFSJ.11.2.04.

11. Kaale L.D., Kimanya M.E., Macha I.J., Mlalila N. Aflatoxin contamination and recommendations to improve its control: A review // World Mycotoxin Journal. 2021. Vol. 14. P. 27–40. DOI: 10.3920/WMJ2020.2599.

12. Javanmardi F., Khodaei D., Sheidaei Z. Decontamination of aflatoxins in edible oils: a comprehensive review // Food Reviews International. 2022. Vol. 38. P. 1410–1426. DOI: 10.1080/87559129.2020.1812635.

13. Alkadi H., Altal J. Effect of microwave oven processing treatments on reduction of Aflatoxin B1 and Ochratoxin A in maize flour // European Journal of Chemistry. 2019. Vol. 10. P. 224–227.

14. Sadeghi E., Solaimanimehr S., Mirzazadeh M., Jamshidpoor S. The effect of gamma irradiation, microwaves, and roasting on aflatoxin levels in pistachio kernels // World Mycotoxin Journal. 2022. Vol. 16. P. 75–84. DOI: 10.3920/WMJ2021.2755.

15. Hassan A.B., Pawelzik E., von Hoersten D. Effect of microwave heating on the physiochemical characteristics, colour and pasting properties of corn (Zea mays L.) grain // LWT. 2021. Vol. 138. P. 110703. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110703.

16. Бурак Л.Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 2. С. 342-357. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510.

17. Zhang Y., Li M., Liu Y., Guan E., Bian K. Degradation of aflatoxin B1 by water-assisted microwave irradiation: Kinetics, products, and pathways // LWT. 2021. Vol. 152. P. 112310. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112310.

18. Chandravarnan P., Agyei D., Ali A. Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review // Trends in Food Science and Technology. 2022. Vol. 124. P. 278–295. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.04.020.

19. Jalili M., Selamat J. & Rashidi L. Effect of thermal processing and traditional flavouring mixture on mycotoxin reduc-

tion in Pistachio // World Mycotoxin Journal. 2020. Vol. 13. P. 381–389. DOI: 10.3920/WMJ2019.2486.

20. 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.

21. Бурак Л. Ч. Ограничения и возможности современных технологий обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024. № 2-3(396). С. 6-13. DOI: 10.26297/0579-3009.2024.2-3.1.

22. Serra M.S., Pulles M.B., Mayanquer F.T. et al. Evaluation of the use of gamma radiation for reduction of aflatoxin B1 in corn (Zea mays) used in the production of feed for broiler chickens // Journal of Agricultural Chemistry and Environment. 2018. Vol. 7. P. 21–33. DOI: 10.4236/jacen.2018.71003.

23. Wang Y., Zhou A., Yu B., Sun X. Recent Advances in Non-Contact Food Decontamination Technologies for Removing Mycotoxins and Fungal Contaminants // Foods. 2024. Vol. 13. P. 2244. DOI: 10.3390/foods13142244.

24. Peng Z., Zhang Y., Ai Z. et al. Current physical techniques for the degradation of aflatoxins in food and feed: safety evaluation methods, degradation mechanisms and products // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2023. Vol. 22. P. 4030–4052. DOI: 10.1111/1541-4337.13197.

25. Zou L., Sun Z., Li Q. et al. UV light treatment (278 nm) for detoxification of aflatoxins and application in edible and medicinal herb coix seed // International Journal of FoodScience and Technology. 2024. Vol. 59. P. 3723–3734. DOI: 10.1111/ijfs.17114.

26. Abuagela M.O., Iqdiam B.M., Mostafa H., Gu L., Smith M.E., Sarnoski P.J. Assessing pulsed light treatment on the reduction of aflatoxins in peanuts with and without skin // International Journal of Food Science and Technology. 2018. Vol. 53. P. 2567–2575. DOI: 10.1111/ijfs.13851.

27. Mostashari P., Amiri S., Rezazad Bari L., Hashemi Moosavi M., Mousavi Khaneghah A. Physical Decontamination and Degradation of Aflatoxins BT – Aflatoxins in Food: A Recent Perspective // Springer International Publishing. 2021. P. 207–232. DOI: 10.1007/978-3-030-85762-2_10.

28. Бурак Л.Ч. Использование озоновой технологии в пищевой промышленности. Минск: Государственное предприятие «СтройМедиаПроект», 2022. 144 с. DOI: 10.12731/978-985-7172-84-9.

29. 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 grits // Microorganisms. 2019. Vol. 7. P. 220. DOI: 10.3390/microorganisms7080220.

30. Li H., Xiong Z., Gui D. et al. Effect of ozonation and UV irradiation on aflatoxin degradation of peanuts // Journal of Food Processing and Preservation. 2019. Vol. 43. P. 1–9. DOI: 10.1111/jfpp.13914.

31. Khoori E., Hakimzadeh V., Mohammadi Sani A., Rashid H. Effect of ozonation, UV light radiation, and pulsed electric field processes on the reduction of total aflatoxin and aflatoxin M1 in acidophilus milk // Journal of Food Processing and Preservation. 2020. Vol. 44. P. 1–8. DOI: 10.1111/jfpp.14729.

32. Mohamed M.H., Mohamed Ammar M.A., Zaki Z.M. & Youssef A.E.K. Ozone as a solution for eliminating the risk of anatoxins detected in some meat products // Current Research in Nutrition and Food Science. 2022. Vol. 10. No. 1. P. 334–348. DOI: 10.12944/CRNFSJ.10.1.28.

33. Nunes V.M., Moosavi M., Mousavi Khaneghah A., Oliveira C.A. Innovative modifications in food processing to reduce the levels of mycotoxins // Current Opinion in Food Science. 2021. Vol. 38. P. 155–161. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.11.010.

34. Martínez J., Hernández-Rodríguez M., Méndez-Albores A. et al. Computational Studies of Aflatoxin B1 (AFB1): a review // Toxins. 2023. Vol. 15. P. 135. DOI: 10.3390/toxins15020135.

35. Kaale L.D. Comparing the effects of essential oils and methanolic extracts on the inhibition of Aspergillus flavus and Aspergillus parasiticus growth and production of aflatoxins // Mycotoxin Research. 2023. Vol. 39. P. 233–245. DOI: 10.1007/s12550-023-00490-6.

36. Chelaghema A., Strub C., de la Noue A.C., Schorr-Galindo S., Fontana A. Plants for plants: Would the solution against mycotoxins be the use of plants extracts? In: Mycotoxins in food and beverages. 2021. P. 154–174. DOI: 10.1201/9781003176046-6.

37. Ngowi P.W., Mmongoyo J.A. & Kaale L.D. Chemical composition and bioactive potential of extracts from Diospyros capricornuta F. White against Aspergillus flavus and Aspergillus parasiticus // Tanzania Journal of Science. 2022. Vol. 48. P. 623–632. DOI: 10.4314/tjs.v48i3.9.

38. Nešić K., Habschied K., Mastanjević K. Possibilities for the biological control of mycotoxins in food and feed // Toxins. 2021. Vol. 13. P. 198. DOI: 10.3390/toxins13030198.

39. Hassan Z.U., Oufensou S., Zeidan R., Migheli Q., Jaoua S. Microbial volatilome in food safety. Current status and perspectives in the biocontrol of mycotoxigenic fungi and their metabolites // Biocontrol Science and Technology. 2023. Vol. 33. P. 499–538. DOI: 10.1080/09583157.2023.2205616.

40. Siva Prasad B.M.V., Bhattiprolu S.L., Prasanna Kumari V., Anil Kumar P. Study of antagonistic capabilities of Trichoderma spp. against Alternaria macrospora Zimm. causing leaf spot in cotton // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2018. Vol. 7. P. 1146–1154. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.706.136.

41. Shabeer S., Asad S., Jamal A. Aflatoxin contamination, its impact and management strategies: an updated review // Toxins. 2022. Vol. 14. P. 1–24. DOI: 10.3390/toxins14050307.

42. Loi M., Logrieco A.F., Pusztahelyi T., Leiter É., Hornok L., Pócsi I. Advanced mycotoxin control and decontamination techniques in view of an increased aflatoxin risk in Europe due to climate change // Frontiers in Microbiology. 2023, Vol. 13. P. 1–18. DOI: 10.3389/fmicb.2022.1085891.

43. Miljaković D., Marinković J., Balešević-Tubić S. The significance of Bacillus spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops // Microorganisms. 2020. Vol. 8. P. 1–19. DOI: 10.3390/microorganisms8071037.

44. Møller C.O.D.A., Freire L., Rosim R.E. et al. Effect of lactic acid bacteria strains on the growth and aflatoxin production potential of Aspergillus parasiticus, and their ability to bind aflatoxin B1, ochratoxin A, and zearalenone in vitro // Frontiers in Microbiology/ 2021. Vol. 12. P. 655386. DOI: 10.3389/fmicb.2021.655386.

45. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Инновационная упаковка для пищевых продуктов // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 2. С. 50-57. DOI: 10.17513/srts.1434.

46. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Пиарик М.И. Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля // Health, Food & Biotechnology. 2023. Т. 5, № 1. С. 51-80. DOI: /10.17513/srts.1434.

47. Бурак Л. Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 91-105. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012.

48. Jafarzadeh S., Hadidi M., Forough M., Nafchi A.M., Mousavi Khaneghah A. The control of fungi and mycotoxins by food active packaging: a review // Critical Reviews inFood Science and Nutrition. 2023. Vol. 63. P. 6393–6411. DOI: 10.1080/10408398.2022.2031099.

49. Opoku B., Osekre E.A., Opit G., Bosomtwe A., Bingham G.V. Evaluation of hermetic storage bags for the preservation of yellow maize in poultry farms in Dormaa Ahenkro // Ghana. Insects. 2023. Vol. 14. P. 141. DOI: 10.3390/insects14020141.

50. Kim Y.K., Qin J., Baek I. et al. Detection of aflatoxins in ground maize using a compact and automated Raman spectroscopy system with machine learning // Current Research in Food Science. 2023. Vol. 7. P. 100647. DOI: 10.1016/j.crfs.2023.100647.