

Интенсификация процесса сушки зерна озонородушной смесью

И. В. Баскаков

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж; Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Озон позволяет ослабить связь влаги с зерновкой и, взаимодействуя с её внутренними компонентами, способствует повышению температуры вороха. Благодаря этому зерно до достижения оптимальных параметров необходимо нагревать меньшее время, что обеспечивает сокращение энергоёмкости процесса сушки. При этом отделение влаги от зерновки происходит более интенсивно, поскольку газ в небольших концентрациях улучшает проницаемость клеточных мембран, вызывает структурные преобразования покровных тканей и способствует ориентации молекул воды вокруг атомарного кислорода.

Целью исследования является повышение эффективности функционирования современных зерносушилок посредством использования процесса озонирования.

Материалы и методы: В качестве теоретико-методической основы исследований были использованы работы в области сушки зерна озонородушной смесью ведущих российских и зарубежных учёных, а также собственные исследования. Исследуемые источники охватывают первые упоминания о применении озона при сушке зерна и последующее развитие данной тематики. В обзор были включены издания, из различных баз данных, среди которых можно выделить: РИНЦ, Scopus, Web of Science, Agris, ФИПС.

Результаты: Часовое предварительное озонирование зерна влажностью 26,3 % способствовало снижению содержания влаги на 1,3 % от исходного значения. В то время как в контрольном образце, который предварительной озонной обработке не подвергался, содержание влаги за тот же период не изменилось. Последующая сушка проозонированного зерна позволила за час операции снять на 1,6 % влажности больше, чем у контрольного образца. При этом условия сушки обеих партий зерна были идентичны. Это свидетельствует о том, что вентилирование зерна озонородушной смесью эффективнее, чем его нахождение в буферном силосе без обработки.

Выводы: Предварительная обработка влажного зернового вороха озонородушной смесью до подачи его в зерносушилку интенсифицирует процесс последующей сушки зерна. При исходной влажности зерна 26,3 % часовая озонная обработка с концентрацией озона в озонородушной смеси 8 мг/м³ способствует снижению содержания влаги на 5,4 % за час сушки. При тех же условиях в опыте без обработки за тот же период снижение влажности зерна составило 3,8 %. Следовательно, предложенный способ сушки зерна повысит эффективность функционирования современных зерносушилок.

Ключевые слова: зерно; семена; озонирование; сушка; зерносушилка

Корреспонденция:

Иван Васильевич Баскаков,
e-mail: vasich2@yandex.ru

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 06.05.2023

Принята: 15.11.2023

Опубликована: 30.11.2023

Copyright: © 2023 Автор



Для цитирования: Баскаков, И.В. (2023). Интенсификация процесса сушки зерна озонородушной смесью. *FOOD METAENGINEERING*, 1(3), 21-32.
<https://doi.org/10.37442/fme.2023.3.7>

Intensification of the Grain Drying Process with an Ozone-Air Mixture

Ivan V. Baskakov

Voronezh State Agrarian University
named after Emperor Peter
the Great, Voronezh, Russian
Federation

ABSTRACT

Background: Ozone allows to weaken the connection of moisture with the grain and, interacting with its internal components, contributes to an increase in the temperature of the heap. Due to this, the grain must be heated for less time before reaching optimal parameters, which reduces the energy intensity of the drying process. At the same time, the separation of moisture from the grain occurs more intensively, since the gas in small concentrations improves the permeability of cell membranes, causes structural transformations of the integumentary tissues and promotes the orientation of water molecules around atomic oxygen.

Purpose: Improving the efficiency of modern grain dryers through the use of the ozonation process.

Materials and Methods: The theoretical and methodological basis of the research was the work in the field of grain drying with an ozone-air mixture by leading Russian and foreign scientists, as well as their own research. The sources under study cover the first mentions of the use of ozone in grain drying and the subsequent development of this topic. The review included publications from various databases, among which are: RISC, Scopus, Web of Science, Agris, FIPS.

Results: Hourly preliminary ozonation of grain with a humidity of 26.3 % contributed to a decrease in the moisture content by 1.3 % from the initial value. While in the control sample, which was not subjected to preliminary ozone treatment, the moisture content did not change over the same period. Subsequent drying of the exposed grain allowed for an hour of operation to remove 1.6 % more moisture than that of the control sample. At the same time, the drying conditions of both batches of grain were identical. This indicates that the ventilation of grain with an ozone-air mixture is more effective than its presence in a buffer silo without processing.

Conclusion: Pretreatment of a wet grain heap with an ozone-air mixture before feeding it to the grain dryer intensifies the process of subsequent grain drying. At the initial grain moisture content of 26.3 %, hourly ozone treatment with an ozone concentration in an ozone-air mixture of 8 mg/m³ reduces the moisture content by 5.4 % per hour of drying. Under the same conditions, in the experiment without processing for the same period, the decrease in grain moisture was 3.8 %. Consequently, the proposed method of grain drying increases the efficiency of modern grain dryers.

Keywords: grains; seeds; ozonation; drying; grain dryer

Correspondence:

Ivan Vasilevich Baskakov
e-mail: vasich2@yandex.ru

Conflict of interest:

The author report the absence of a conflict of interest.

Received: 06.05.2023

Accepted: 15.11.2023

Published: 30.11.2023

Copyright: © 2023 The Author



To cite: Baskakov, I.V. (2023). Intensification of the Grain Drying Process with an Ozone-Air Mixture. *FOOD METAENGINEERING*, 1(3), 21-32.
<https://doi.org/10.37442/fme.2023.3.7>

Введение

В XXI веке поиск незагрязняющих природу технологий имеет важное значение. При этом применение озона в различных отраслях народного хозяйства всё более популярно. Озонирование уже используется в медицине, микробиологии, косметологии, жилищно-коммунальном хозяйстве, пищевой и химической промышленности. Всё более широкое распространение газа прослеживается и в сельском хозяйстве. Различные учёные проводили ряд исследований при использовании озона в растениеводстве, садоводстве, животноводстве, птицеводстве, пчеловодстве, а также при хранении, сушке и послеуборочной обработке зерна (Prudente & King, 2002; László et al., 2008; Pereira et al., 2008; Rozado et al., 2008; Ксенз и соавт., 2010; Буханцов, 2012; Пахомов и соавт., 2013; Baskakov et al., 2020).

Уборка сельскохозяйственных культур зачастую происходит в неблагоприятных погодных условиях, когда влажность зерна и семян превышает кондиционные значения. Из-за продолжительного периода вегетации некоторые растения, например кукурузу, на большей территории страны в принципе невозможно убрать без проведения последующей сушки. Довести до кондиционного состояния зерновой материал влажностью свыше 20% за один проход через большинство современных зерносушилок невозможно. Очередная загрузка оборудования посредством вертикальной нории приведёт к дополнительному повреждению зерна в районе 3,3...4,6% (Баскаков, 2019). Поэтому исследования, направленные на повышение интенсификации процесса сушки, актуальны. Кроме того, себестоимость послеуборочной обработки зерна можно существенно уменьшить за счёт снижения энергоёмкости современных зерносушилок посредством применения озонОВОЗДУШНОЙ смеси.

Возможность использования озонирования в сельском хозяйстве было предложено в 80-х годах XX века. Однако до настоящего момента промышленное внедрение газа в отрасль не реализовано. Изначально это было связано со сложной конструкцией озонаторов и высокой себестоимостью процесса. Кроме того, озон в нашей стране относится к наивысшему классу опасности вредных веществ, что также накладывает ряд ограничений на его использование. Современный уровень развития техники позволил создать компактные, относительно недорогие озонаторы, что потребовало пересмотреть отношение к озонным технологиям.

Целью данного исследования являлось повышение эффективности функционирования современных зерносушилок посредством использования процесса озонирования. Задача исследования: определить эффективность предварительного озонирования влажного зернового вороха перед сушкой зерна. Гипотеза исследования: озонОВОЗДУШНАЯ смесь способствовала расширению межклеточных мембран зерновки, что позволило проникнуть озону внутрь и ослабить связь влаги с органическими компонентами зерна, благодаря чему процесс сушки интенсифицировался.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическое обоснование

В качестве теоретико-методической основы исследований были использованы работы в области сушки зерна озонОВОЗДУШНОЙ смесью ведущих российских и зарубежных учёных, а также собственные исследования. При этом использовались результаты исследований по использованию озонОВОЗДУШНОЙ смеси при сушке зерна, заимствованные из авторских свидетельств (Глущенко и соавт., 1984), патентов на изобретения РФ (Голубкович & Чижиков, 2003; Пахомов и соавт., 2011; Баскаков и соавт., 2019), диссертаций (Троцкая, 1998; Штанько, 2000; Баскаков, 2020), научных статей (Троцкая, 1985; Голубкович и соавт., 2002; László et al., 2008; Pereira et al., 2008; Ксенз и соавт., 2010; Буханцов, 2012; Пахомов и соавт., 2013; Ксенз & Шабанов, 2014; Пахомов и соавт., 2019; Baskakov et al., 2020). Исследуемые источники охватывают первые упоминания о применении озона при сушке зерна и последующее развитие данной тематики. В обзор были включены как отечественные, так и зарубежные исследования, из различных баз данных, среди которых можно выделить: РИНЦ, Scopus, Web of Science, Agris, ФИПС и другие.

Объект исследования

Объектом исследования является процесс взаимодействия зерна с озонОВОЗДУШНОЙ смесью.

Оборудование

При проведении собственных исследований использовали лабораторную установку, оборудованную регулируемым по концентрации озонатором производства ООО «ОЗОН ПРОМ-ТЕХ», генерация озона в котором

происходит благодаря импульсным преобразователям напряжения и частоты из воздуха и лабораторную зерносушилку шахтного типа.

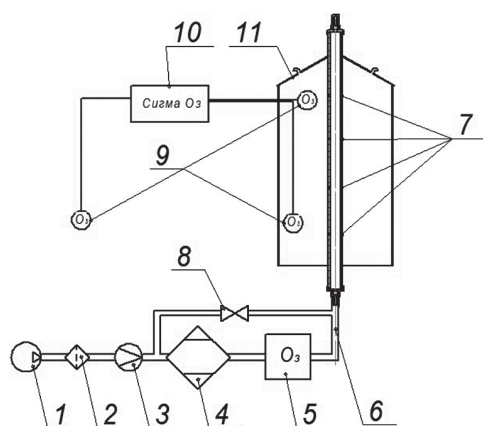
Схема лабораторной установки по озонированию влажного зернового вороха представлена на Рисунке 1. Озонированию подвергалось зерно озимой пшеницы общей массой 30 кг и средней влажностью 27,3 %, которое вентилировали в течение часа озоновоздушной смесью с расходом агента 1 м³/ч и средней концентрацией озона 8 мг/м³. При этом технологический процесс работы комплекса по озонированию зернового вороха протекал следующим образом. Атмосферный воздух безмасляным компрессором 1 через фильтр 2 и расходомер 3 подавался в рефрижераторный осушитель воздуха 4 и далее в озонатор 5. Полученная при этом озоновоздушная смесь по системе аэрации поступала в металлическую ёмкость 11 вместимостью 50 л. Для более равномерного распределения газа нижние отверстия в распределители 7 имеют меньший диаметр, чем более верхние. В случае необходимости для дополнительного снижения концентрации озона

в озоновоздушной смеси использовали отдельный газопровод, минуящий озонатор, перекрывающийся краном 8. За концентрацией озона следили по газоанализатору «Сигма-О₃», причём два датчика «Сигма-03.ДЭ» располагались внутри камеры озонирования, а третий снаружи для соблюдения уровня ПДК в рабочей зоне человека, который в нашей стране составляет 0,1 мг/м³, что в пять раз больше, чем максимально зафиксированные значения в период эксперимента 0,02 мг/м³. В качестве контрольного образца использовали такую же партию зерна исходной влажностью 27,3 %, находящуюся в помещении при температуре 25 °С и не подвергающуюся озонированию.

Контрольный образец и проозонированное зерно в одинаковых пропорциях были загружены в лабораторную шахтную зерносушилку, изображённую на Рисунке 2. При этом внутренняя шахта 10 разделена перегородками 2 на два независимых отсека, исключающих возможность смешивания продуктов сушки. Загрузка и выгрузка образцов проводилась через одинаковые полчасовые промежутки времени равными

Рисунок 1

Схема лабораторной установки по озонированию влажного зернового вороха

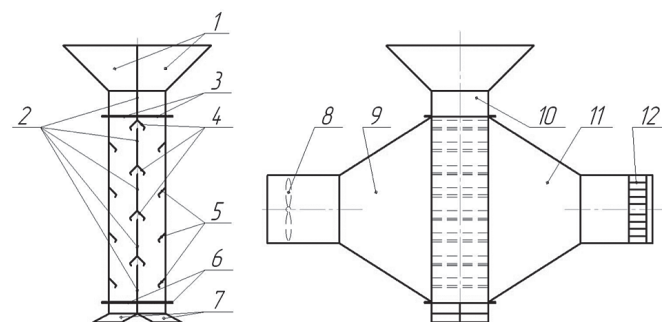


Примечание. 1 — компрессор; 2 — фильтр; 3 — расходомер; 4 — осушитель воздуха; 5 — озонатор; 6 — газопровод; 7 — распределитель; 8 — кран; 9 — датчик Сигма-03.ДЭ; 10 — газоанализатор Сигма О₃; 11 — ёмкость.

Адаптировано из "Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала", автор И.В. Баскаков, 2020, дисс. д. с. х. н., с. 109. Copyright 2020 Баскаков И.В.

Рисунок 2

Схема лабораторной шахтной зерносушилки



Примечание. 1 — загрузочный бункер; 2 — перегородки; 3 и 6 — загрузочные и выгрузные заслонки; 4 — подводящие короба горячего воздуха; 5 — отводящие короба отработанного воздуха; 7 — отводящие патрубки сухого зерна; 8 — вентилятор; 9 — камера влажного воздуха; 10 — шахта, разделённая на два независимых потока зерна; 11 — камера горячего воздуха; 12 — нагревательный элемент.

Адаптировано из "Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала", автор И.В. Баскаков, 2020, дисс. д. с. х. н., с. 143. Copyright 2020 Баскаков И.В.

порциями. Условия сушки заранее проозонированного зерна и контрольного образца были абсолютно одинаковыми.

В ходе проведения эксперимента температура агента сушки в камере нагретого воздуха 11 (Рисунок 2) в среднем составляла 55°C с кратковременным диапазоном варьирования 49,1...59,9°C. После прохождения слоя зерна данный параметр снижался до $23,1 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Обработка экспериментальных данных

При обработке полученных результатов исследований использовали методы статистической обработки данных Microsoft Office Excel.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Учёные, заложившие основы исследований эффективности работы зерносушилок посредством использования озонородушной смеси в качестве сушильного агента, выявили, что проникновение озона внутрь зерна происходит по закону диффузии газов (Троцкая, 1985). При этом окислитель вступает в ряд химических реакций, которые сопровождаются выделением тепла. Благодаря этому снижается энергоёмкость процесса сушки, так как для нагревания зернового материала до оптимальной температуры требуется меньше времени. В конечном итоге, озон способствует подогреванию зерна изнутри, тем самым, повышая коэффициент диффузии влаги и ускоряя парообразование. В результате количество теплоты, необходимой для отрыва молекул воды в процессе сушки, снижается на 20...60% (Глуценко и соавт., 1984; Троцкая, 1985; Голубкович и соавт., 2002; Буханцов, 2012; Пахомов и соавт., 2013).

Процесс сушки посредством озонородушной смеси можно разбить на три этапа. Сначала озон, взаимодействуя с органическими веществами на поверхности зерна, способствует выводу излишней влаги за счёт ориентации молекул воды вокруг атомарного кислорода, что облегчает их вынос воздушным потоком. Затем газ улучшает проницаемость клеточных мембран и вызывает структурные преобразования покровных тканей. Благодаря этому влага из внутренних слоёв более интенсивно продвигается к поверхности зерна. На последнем этапе сушки производится вывод сорбционно-связанных молекул воды за счёт ослабления дипольных связей.

Сушка зерна посредством применения озонородушной смеси способствует снижению времени процесса. Однако данное влияние у различных растений отличается. Из зерновых культур наибольшая скорость сушки зерна наблюдается у овса и ячменя, а наименьшая у пшеницы и ржи в диапазоне концентрации озона 2...11 мг/м³. Это объясняется особенностями строения семени данных растений и разной скоростью проникновения озона внутрь конкретной зерновки. По этой же причине в начале экспериментов влияние озонородушной смеси на снижение влажности зерна не прослеживается и находится в диапазоне погрешности измерений (Глуценко и соавт., 1984; Троцкая, 1985). Существенное снижение процента снятой влаги наблюдается только после насыщения зерна озоном. Поскольку внутреннее строение зерновки и условия проведения опытов напрямую влияют на диффузию газа внутрь семени, то эффективность процесса озонирования зависит от исходного состояния вороха и режимов процесса. В целом обработка зерна озонородушной смесью сокращало время его доведения до кондиционного состояния у всех исследуемых зерновых культур от 1,3 до 2,5 раз (Рисунок 3).

Анализ результатов исследований Глуценко и соавт. (1984) и Троцкая (1985) по снижению влажности зерна зерновых культур со временем сушки с достаточной точностью описываются полиномиальной зависимостью второй степени

$$W = -k_1 \cdot t^2 - k_2 \cdot t + k_3, \quad (1)$$

где W — влажность зерна, %;

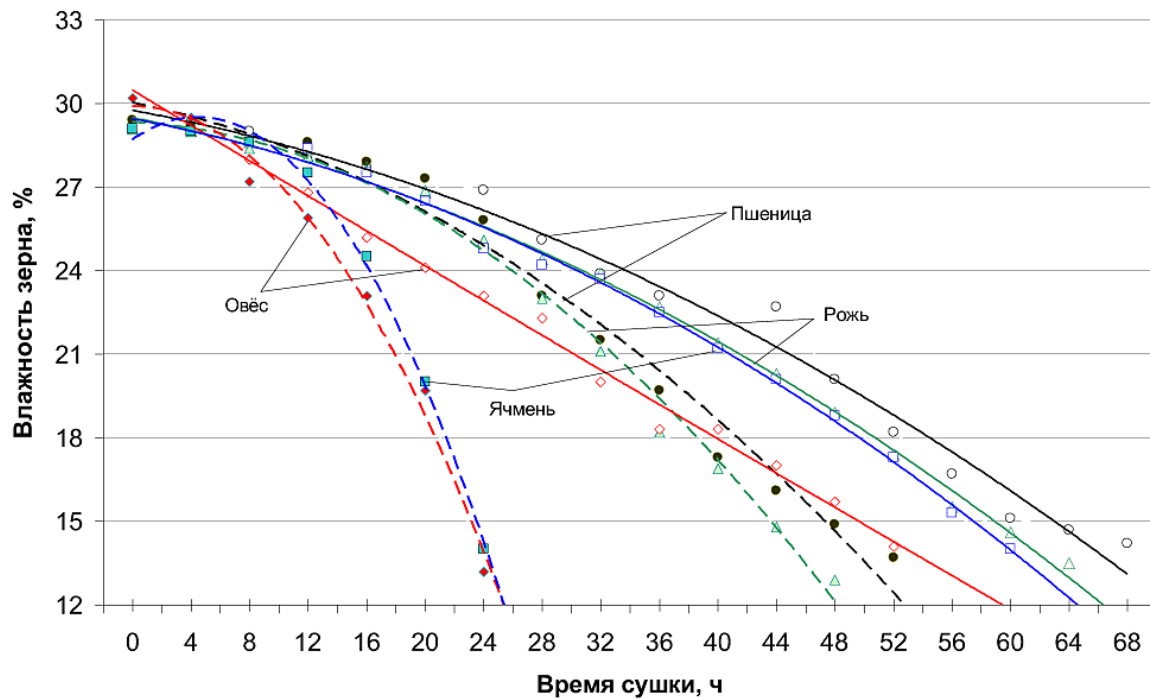
t — время сушки, ч;

k_1, k_2, k_3 — коэффициенты.

Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3 представлены в Таблице 1. В целом просматривается некоторая тенденция в изменении их величины при воздействии в качестве сушильного агента озонородушной смеси. Коэффициент k_1 при сушке зерна с использованием подогретого воздуха колеблется в диапазоне $-0,043 \dots -0,001$. Применение в качестве сушильного агента озонородушной смеси уменьшает данный множитель в 0,004...0,48 раз. Коэффициент k_2 наоборот увеличивается при сушке зерна с использованием озона по сравнению с контрольными образцами. Свободный член уравнения при применении процесса озонирования, как правило, уменьшается или практически не изменяется (Baskakov et al., 2020).

Рисунок 3

Результаты сушки зерна озоновоздушной смесью и воздухом в бункере активного вентилирования



Примечание. — сушка воздухом; - - - сушка озоновоздушной смесью. Адаптировано из 'Способ сушки семян зерновых культур', авторы Н.А. Глущенко, Л.Ф. Глущенко и Т.П. Троцкая, 1984, А.с. № 1095899 СССР, МПК А01F 25/08 (2000/01).

Таблица 1

Уравнения регрессии при сушке зерна озоновоздушной смесью и воздухом в бункере активного вентилирования

Культура	Сушка с использованием	Уравнение регрессии	Коэффициент достоверности аппроксимации R^2
Пшеница	Воздуха	$W = -0,0346 \cdot t^2 - 0,3217 \cdot t + 30,107$	0,9864
	Озоновоздушной смеси	$W = -0,0714 \cdot t^2 - 0,2802 \cdot t + 30,366$	0,981
Рожь	Воздуха	$W = -0,0381 \cdot t^2 - 0,3465 \cdot t + 29,879$	0,9961
	Озоновоздушной смеси	$W = -0,111 \cdot t^2 - 0,1209 \cdot t + 29,308$	0,9912
Ячмень	Воздуха	$W = -0,0422 \cdot t^2 - 0,3139 \cdot t + 29,81$	0,9962
	Озоновоздушной смеси	$W = -0,6405 \cdot t^2 + 2,7167 \cdot t + 26,614$	0,9959
Овёс	Воздуха	$W = -0,0019 \cdot t^2 - 1,2744 \cdot t + 31,752$	0,9946
	Озоновоздушной смеси	$W = -0,4464 \cdot t^2 + 0,9036 \cdot t + 29,429$	0,9892

Примечание. Адаптировано из 'Способ сушки семян зерновых культур', авторы Н.А. Глущенко, Л.Ф. Глущенко и Т.П. Троцкая, 1984, А.с. № 1095899 СССР, МПК А01F 25/08 (2000/01).

Исследования Глущенко и соавт. (1984) и Троцкая (1985) свидетельствуют, что озоновоздушная смесь способствует интенсификации процесса сушки зерна в бункерах активного вентилирования у всех исследуемых зерновых культур. Однако наиболее явно действие

озона наблюдается на овсе и ячмене, а наименее — на ржи и пшенице. Это может быть объяснено разной структурой зерновки. Наименьший эффект наблюдался у озимой пшеницы, которое, как известно, имеет самое плотное зерно с натурой 730...740 г/л. Чуть

более эффективно происходила сушка ржи, натура зерна у которой колеблется в диапазоне 690...710 г/л. Зерно ячменя ещё лучше подвергалось сушке активным вентилированием и соответственно его натура 545...605 г/л. Наилучшие показатели были достигнуты на овсе с натурой 460...540 г/л.

При сушке зерна в зерносушилках процесс протекает более стремительно (см. Рисунок 4), поскольку температура агента сушки в них гораздо выше, чем при вентилировании. Эксперимент проводили на тритикале. Зерно исходной влажностью 29% довели до кондиционного состояния в стандартной зерносушилке за шесть часов. Использование озоновоздушной смеси позволило сократить время сушки на 2 часа.

При этом процесс сушки в стандартной зерносушилке всё также можно описать полиномиальной зависимо-

стью (1) второй степени. Однако коэффициенты k_1, k_2, k_3 приобретают другие значения (Таблица 2).

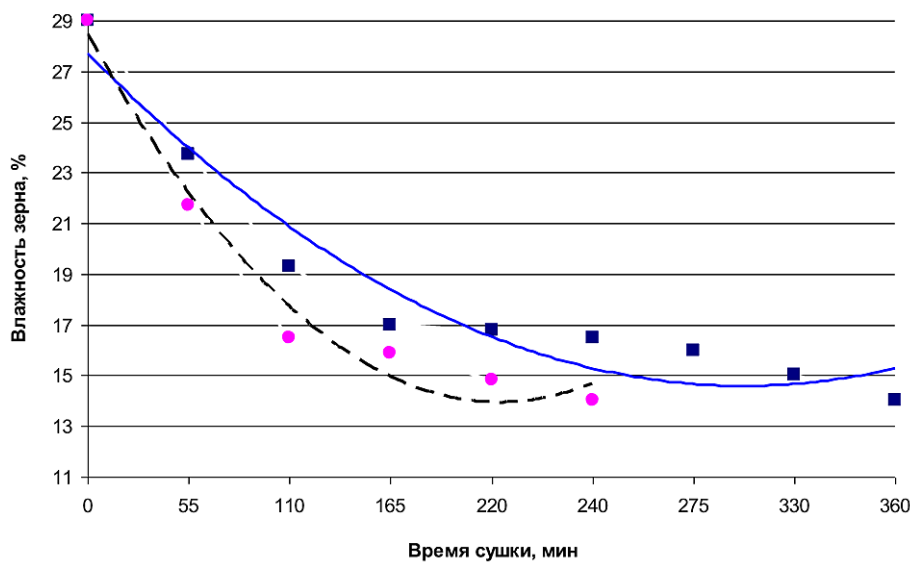
Глуценко и соавт. (1984) и Троцкой (1985) показали, что на эффективность процесса сушки влияет концентрация озона в озоновоздушной смеси. Изменение скорости сушки зерна зерновых культур от концентрации озона в озоновоздушной смеси, с достаточной точностью описываются полиномиальной зависимостью третьей степени

$$V = -m_1 \cdot C^3 + m_2 \cdot C^2 + m_3 \cdot C + m_4, \quad (2)$$

где V — скорость сушки зерна данной культуры, %/час;
 C — концентрация озона в озоновоздушной смеси, мг/м³;
 m_1, m_2, m_3, m_4 — коэффициенты (Таблица 3).

Рисунок 4

Результаты сушки зерна тритикале озоновоздушной смесью и воздухом



Примечание. — сушка воздухом; - - - - сушка озоновоздушной смесью. Адаптировано из 'Электроактивирование процессов сушки растительных материалов', автор Т.П. Троцкая, 1998, Дисс. д. тех. н., с. 138. Copyright 1998 Троцкая Т.П.

Таблица 2

Уравнения регрессии при сушке зерна озоновоздушной смесью и воздухом в шахтной зерносушилке

Культура	Сушка с использованием	Уравнение регрессии	Коэффициент достоверности аппроксимации R^2
Тритикале	Воздуха	$W = 0,3106 \cdot t^2 - 4,6594 \cdot t + 32,05$	0,94
	Озоновоздушной смеси	$W = 0,8732 \cdot t^2 - 8,8639 \cdot t + 36,43$	0,98

Таблица 3

**Зависимость изменения скорости сушки зерна озонородушной смесью в бункере активного вентилирования
в зависимости от концентрации озона**

Культура	Уравнение регрессии	Коэффициент достоверности аппроксимации R^2
Овёс	$V = -0,0111 \cdot C^3 + 0,089 \cdot C^2 + 0,1359 \cdot C + 0,2086$	0,9541
Ячмень	$V = -0,0172 \cdot C^3 + 0,1856 \cdot C^2 - 0,2986 \cdot C + 0,4086$	0,9868
Рожь	$V = -0,0183 \cdot C^3 + 0,2201 \cdot C^2 - 0,5437 \cdot C + 0,4829$	0,9935
Пшеница	$V = -0,0167 \cdot C^3 + 0,2033 \cdot C^2 + -0,5471 \cdot C + 0,5686$	0,9809

Примечание. Адаптировано из 'Электроактивирование процессов сушки растительных материалов', автор Т.П. Троцкая, 1998, Дисс. д. тех. н. стр. 138. Copyright 1998 Троцкая Т.П.

Следовательно, наряду со структурой зерновки концентрация озона в озонородушной смеси также оказывает существенное влияние на процесс сушки зерна.

В большинстве современных зерносушилках за один проход зерносмеси можно снизить её влажность не более чем на 6 %. Более длительное нахождение зернового материала в сушильной колонне приводит к потере качественных показателей зерна из-за его перегрева. При этом допустимая температура сушки товарного и кормового сырья определяется из условия сохранения потребительских и технологических свойств, а при обработке семян предельный нагрев назначается с учётом сохранения энергии прорастания и всхожести. Использование в качестве сушильного агента озонородушной смеси позволит повысить процент снятой влаги за один пропуск через зерносушилку.

Подобные исследования проводились в РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию». Зерно исходной влажностью 24...25 % сушили на колонковой зерносушилке СЗК-15. Причём в качестве сушильного агента использовали как обычный воздух, так и озонородушную смесь. Довести зерно до кондиционного состояния в стандартной зерносушилке удалось только за два цикла. При этом влажность продукта после первого пропуска варьировалась в диапазоне 19...22 %, а после второго — 11...13 %. Время, затрачиваемое на один цикл, составляло 2,0...2,8 часа. Применение в качестве сушильного агента озонородушной смеси позволило просушить зерно до влажности 12...13 % за один пропуск через зерносушилку. Благодаря чему производительность оборудования увеличилась в 35,7...50 %, а также снизился удельный расход топлива (Троцкая и соавт., 2008). Таким образом, за один цикл сушки при использовании озонородушной смеси

удалось снять до 12 % влажности зерна и исключить из технологической линии дополнительный подъём материала вертикальной норией, что позволило снизить травмирование зерна.

Повышение производительности отмечено и на других типах зерносушилок. Так, зерноградские учёные высушивали зерно ячменя исходной влажностью 26,2 % на башенной сушилке СБВС-5. При этом увеличение производительности оборудования при использовании в качестве сушильного агента подогретой до температуры 48 °С озонородушной смеси составило 1,9 раза по сравнению со стандартной зерносушилкой. Длительность процесса сократилось на 53 % (Ксенз и соавт., 2010).

В целом применение озонородушной смеси в качестве сушильного агента показало свою эффективность. Однако вопрос обеспечения безопасности процесса остался нерешённым, так как зерносушилки не имеют замкнутого воздушного контура и газ свободно выходит из неё, негативно влияя на здоровье человека и животных. Поэтому практического применения данная технология сушки не нашла. Высокая эффективность процесса сушки с применением озонородушной смеси подтолкнула многих ученых проводить дальнейшие исследования и совершенствовать способ обработки и оборудование (Штанько, 2000; Голубкович и соавт., 2002; Ксенз и соавт., 2010; Пахомов и соавт., 2011; Буханцов, 2012; Баскаков и соавт., 2019).

В ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ был запатентован способ сушки зерновых материалов (Баскаков и соавт., 2019), который состоит из двух этапов: предварительное озонирование влажного зернового вороха и последующая сушка обработанного озонородушной смесью зерна

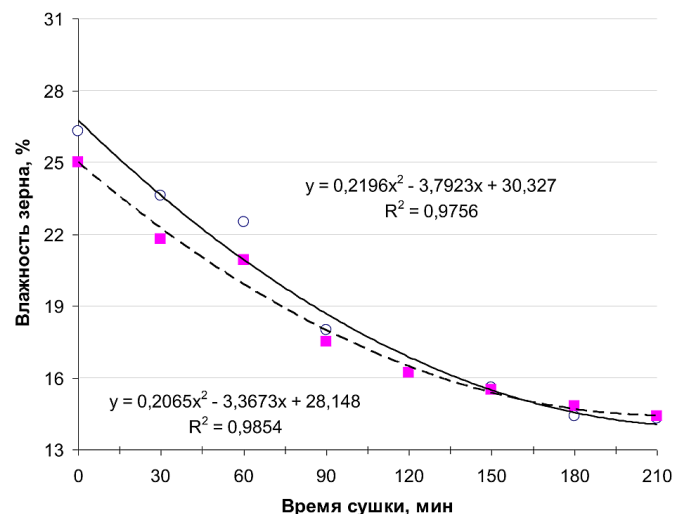
на серийных шахтных зерносушилках. Это позволит устранить недостаток ранее проведённых исследований, так как обработка будет проводиться в достаточно герметичном буферном силосе, а в местах возможных утечек газа следует установить катализаторы, разлагающие остаточный озон.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение озоновоздушной смеси при сушке зерна доказало свою эффективность, однако дискуссионным остаётся вопрос режимов проведения операции. Поскольку затраты на доведение зерна до кондиционного состояния по влажности являются существенными, то необходимо совершенствовать режимные параметры работы как озонатора, так и зерносушилki. Поэтому на основе проведённого литературного обзора и его анализа была выдвинута идея, что возможно озонировать на всём протяжении сушки не надо. Обработку зерна озоном необходимо проводить заранее в буферных металлических силосах, которые предусмотрены на большинстве зерносушильных комплексах. Оснастить их системой озонирования не составит большого труда и денежных затрат. Это позволит расширить межклеточные мембраны, ослабить связь молекул воды с органическими компонентами зерновки, подтянув их к периферии зерна. Причем при небольших значениях влажности зерна (16...17%) вентилирование озоновоздушной смесью позволит довести его до кондиционного состояния без использования зерносушилki. В случае чрезмерного содержания влаги в зерновом

Рисунок 5

Результаты сушки зерна озимой пшеницы в лабораторной шахтной зерносушилке с предварительным озонированием влажного вороха



Примечание. — сушка контрольного образца;
- - - сушка проозонированного образца

материале сушка заранее проозонированного вороха будет протекать более эффективно и с меньшими энергетическими затратами. С целью подтверждения данной гипотезы был проведен эксперимент, результаты которого представлены в Таблице 4 и на Рисунке 5.

Таблица 4

Результаты эксперимента по определению влияния предварительной обработки зерна озимой пшеницы озоновоздушной смесью на эффективность его сушки

Время сушки, мин	Контрольный, необработанный образец зерна		Экспериментальная партия зерна после часовой вентиляции озоновоздушной смесью	
	Влажность, %	Температура, °C	Влажность, %	Температура, °C
0	26,3	25,4	25,0	26,0
30	23,6	26,7	21,8	26,8
60	22,5	24,0	20,9	23,7
90	18,0	23,8	17,5	23,8
120	16,2	24,5	16,2	23,9
150	15,6	23,8	15,5	24,5
180	14,4	24,1	14,8	24,3
210	14,3	24,4	14,4	25,1

В результате предварительной обработки влажного зернового вороха озонородоушной смесью зерно после озонирования снизило влажность до 25 %. При этом в контрольном образце данный параметр составил 26,3 %. Анализ результатов эксперимента доказывает, что действие озона, в основном, прослеживается на протяжении первого часа. За 30 минут сушки влажность в экспериментальной партии зерна снизилась на 3,8 %, что составляет 12,8 % по отношению к первоначальному значению. В контрольном образце за полчаса сушки удалось снизить наличие влаги на 2,7 % или на 10,3 % относительно начала опыта. Это свидетельствует о том, что предварительное озонирование влажного вороха способствует ускорению водоотдачи в начальный период сушки на 1,1 % при заданных параметрах или на 2,5 % по отношению к первоначальному значению. Впоследствии озон разложился и далее процесс протекал со схожими параметрами.

При исходной влажности зерна 26,3 % снимать за один проход более 4...5 % влаги нельзя из-за резкого снижения качественных показателей. Как видно из таблицы 4, показателя в 20,9 % при предварительном озонировании удалось добиться за час сушки. В то время как использование традиционного способа способствовало снижению влажности за тот же период до 22,5 %. Следовательно, предварительное озонирование влажного зернового вороха производит интенсификацию процесса последующей сушки на зерносушилках. При столь высоком содержании влаги необходимо ворох отправить на отводолаживание в буферный силос, где опять следует провести его озонную обработку и цикл сушки повторить.

Согласно результатам данного исследования, во первых, часовое озонирование способствует снижению влажности зернового вороха на 1,3 % от исходного значения 26,3 %. Это свидетельствует о том, что вентилирование озонородоушной смесью в заданных условиях эффективнее, чем нахождение зерна в буферном силосе без обработки. Во-вторых, предварительное часовое озонирование способствует абсорбции озона в зерне, что в начальный период сушки позволило за час снять на 1,6 % влажности больше, чем у контрольного образца. Следовательно, предложенный способ сушки, включающий два этапа — предварительное озонирование влажного зерна и последующую её сушку является эффективным и следует расширять подобные исследования для уточнения практических рекомендаций по его использованию.

Таким образом, целесообразность озонирования металлических силосов влажного зерна перед сушкой на стан-

дартных зерносушилках прослеживается. Однако для повышения эффективности процесса необходимо провести ряд исследований по определению влияния концентрации озона и времени обработки на абсорбцию газа зерновым ворохом. Возможно, интенсифицировать сушку удалось и из-за снижения температуры сушильного агента. Подобный вывод сделан на основе данных Ксенз и др. (2013) об ускорении распада озона при температуре выше 38 °C. Немаловажным является и тот факт, что снижение температуры сушильного агента и времени сушки приведёт к значительной экономии энергозатрат. Посредством серии опытов предстоит определить, насколько процесс сушки на стационарных шахтных и жалюзийных сушилках заранее озонированного зерна в силосах будет менее энергоёмким? При этом для обеспечения безопасности исследований необходимо оборудование оснастить датчиками превышения предельно-допустимой концентрации озона в рабочей зоне, а в возможных местах утечек смонтировать соответствующие катализаторы. Одновременно силосные зернохранилища и механизмы загрузки-выгрузки нужно максимально загерметизировать.

ВЫВОДЫ

Применение предварительной обработки влажного зернового вороха озонородоушной смесью интенсифицирует процесс последующей сушки зерна. За один пропуск с исходной влажности зерна 26,3 % за один час сушки удалось снизить его влажность на 5,4 %, в то время как в опыте без обработки за тот же период снижение влажности зерна составило 3,8 %. Это существенно ускорит процесс, снизив энергозатраты и время сушки. Следовательно, повысит эффективность функционирования современных зерносушилок посредством использования процесса озонирования. Применение силосов, оборудованных системой аэрации и озонаторной установкой, позволит содержать полусухое зерно без дополнительной операции сушки, поскольку вентилирование силосных зернохранилищ озонородоушной смесью позволяет снизить влажность вороха.

Необходимо расширять экспериментальную базу, что в последствии позволит дать практические рекомендации по применению предложенного способа сушки зерна на предприятиях АПК и внедрить его в производство.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Баскаков, И.В. (2019). *Совершенствование технологии послеуборочной обработки и хранения зернового материала* [Дисс. д. с-х. наук]. Воронежский государственный аграрный университет.
- Baskakov, I.V. (2019). *Improvement of technology for post-harvest processing and storage of grain material* [Doctoral dissertation in Agricultural Sciences]. Voronezh State Agrarian University. (In Russ.)
- Баскаков, И.В., Оробинский, В.И., Гиевский, А.М., Гулевский, В.А., Чернышов, А.В., & Чернова, О.В. (2019). *Способ сушки зернового материала*. Патент на изобретение № 2709712 С1 РФ, МПК А01F 25/08.
- Baskakov, I.V., Orobinsky, V.I., Gievsky, A.M., Gulevsky, V.A., Chernyshov, A.V., & Chernova, O.V. (2019). *Method of drying grain material*. Patent No. 2709712 С1 RF, IPC A01F 25/08. (In Russ.)
- Буханцов, К.Н. (2012). Озон и аэроионы: возможности и проблемы использования для сушки зерна (Часть 1). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 8, 11–17.
- Bukhantsov, K.N. (2012). Ozone and Aeroions: Opportunities and Problems of Use for Grain Drying (Part 1). *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 8, 11–17. (In Russ.)
- Буханцов, К.Н. (2012). Озон и аэроионы: возможности и проблемы использования для сушки зерна (Часть 2). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 9, 13–16.
- Bukhantsov, K.N. (2012). Ozone and Aeroions: Opportunities and Problems of Use for Grain Drying (Part 2). *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 9, 13–16.
- Буханцов, К.Н. (2012). Озон и аэроионы: возможности и проблемы использования для сушки зерна (Часть 3). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 10, 18–20.
- Bukhantsov, K.N. (2012). Ozone and Aeroions: Opportunities and Problems of Use for Grain Drying (Part 3). *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 10, 18–20.
- Глущенко, Н.А., Глущенко, Л.Ф., & Троцкая, Т.П. (1984). *Способ сушки семян зерновых культур*. Авторское свидетельство № 1095899 СССР, МПК А01F 25/08 (2000/01).
- Glushchenko, N.A., Glushchenko, L.F., & Trotskaya, T.P. (1984). *Method of drying cereal seeds*. Author's certificate No. 1095899 USSR, IPC A01F 25/08 (2000/01). (In Russ.)
- Голубкович, А.В., Рудобашта, С.П. & Нуриев, Н.Н. (2002). Энергосбережение при активном вентилировании и низкотемпературной сушке зерна озono-воздушной смесью. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 8, 59–60.
- Golubkovich, A.V., Rudobashta, S.P. & Nuriev, N.N. (2002). Energy saving in active ventilation and low-temperature drying of grain with an ozone-air mixture. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 8, 59–60. (In Russ.)
- Голубкович, А.В. & Чижиков, А.Г. (2003). *Способ сушки зерна и семян*. Патент на изобретение РФ № 2196417 РФ, МПК А01F 25/00, А01F 25/08, А01F25/22, А23В 9/08, А23В 8/18.
- Golubkovich, A.V. & Chizhikov, A.G. (2003). *Method for drying grain and seeds*. Patent of the Russian Federation No. 2196417, IPC A01F 25/00, A01F 25/08, A01F25/22, A23B 9/08, A23B 8/18. (In Russ.)
- Ксенз, Н.В., Леонтьев, Н.Г. & Сидорцов, И.Г. (2013). Энергосбережение в технологиях сельскохозяйственного производства за счёт использования озonoвоздушных смесей. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 13, 53–59.
- Ksenz, N.V., Leontiev, N.G., & Sidortsov, I.G. (2013). Energy saving in agricultural production technologies through the use of ozone-air mixtures. *Works of the Tavria State Agrotechnological University*, 13, 53–59. (In Russ.)
- Ксенз, Н.В., Попандопуло, К.Х., Сорокин, Б.Н. & Сидорцов, И.Г. (2010). Энергосберегающая технология сушки зерна. *Вестник аграрной науки Дона*, 2, 11–16.
- Ksenz, N.V., Popandopulo, K.H., Sorokin, B.N., & Sidortsov, I.G. (2010). Energy-saving technology for grain drying. *Bulletin of Agrarian Science of Don*, 2, 11–16. (In Russ.)
- Ксенз, Н.В. & Шабанов, Н.И. (2014). Способы снижения энергоёмкости процесса сушки семян зерновых культур использованием электрофизических. *Вестник АПК Ставрополя*, 2(14), 48–51.
- Ksenz, N.V. & Shabanov, N.I. (2014). Methods to reduce the energy intensity of the process of drying cereal seeds using electrophysical means. *Bulletin of the Agro-Industrial Complex of Stavropol*, 2(14), 48–51. (In Russ.)
- Ксенз, Н.В., Белоусов, А.В., Леонтьев, Н.Г. & Сидорцов, И.Г. (2014). Озonoвоздушная смесь как эффективный инструмент для сушки зерна. *Международный сельскохозяйственный журнал*, 4, 49–50.
- Ksenz, N.V., Belousov, A.V., Leontiev, N.G. & Sidortsov, I.G. (2014). Ozone-air mixture as an effective tool for grain drying. *International Agricultural Journal*, 4, 49–50. (In Russ.)

- Пахомов, В.И., Максименко, В.А. & Буханцов, К.Н. (2011). *Способ сушки зерновых материалов*. Патент на изобретение РФ № 2422741 C1, МПК F26B 3/14.
- Pakhomov, V.I., Maksimenko, V.A. & Bukhantsov, K.N. (2011). *Method of drying grain materials*. Patent of the Russian Federation No. 2422741 C1, IPC F26B 3/14. (In Russ.)
- Пахомов, В.И., Максименко, В.А. & Буханцов, К.Н. (2013). Энергосберегающая технология комбинированной высокотемпературной конвективной сушки и озонОВОЗДУШНОЙ обработки зерна (Часть 1). *Хранение и переработка сельхозсырья*, (5), 19–25.
- Pakhomov, V.I., Maksimenko, V.A. & Bukhantsov, K.N. (2013). Energy-saving technology of combined high-temperature convective drying and ozone-air treatment of grain (Part 1). *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, (5), 19–25. (In Russ.)
- Пахомов, В.И., Максименко, В.А. & Буханцов, К.Н. (2013). Энергосберегающая технология комбинированной высокотемпературной конвективной сушки и озонОВОЗДУШНОЙ обработки зерна (Часть 2). *Хранение и переработка сельхозсырья*, (6), 23–27.
- Pakhomov, V.I., Maksimenko, V.A. & Bukhantsov, K.N. (2013). Energy-saving technology of combined high-temperature convective drying and ozone-air treatment of grain (Part 2). *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, (6), 23–27. (In Russ.)
- Пахомов, В.И., Пахомов, В.И., Газалов, В.С. & Буханцов, К.Н. (2019). Регрессионная математическая модель двухэтапной комбинированной электротехнологии высокотемпературной конвективной сушки и озонОВОЗДУШНОЙ обработки зерна. *Тракторы и сельхозмашины*, 1, 81–95. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-1-81-95>
- Pakhomov, V.I., Pakhomov, V.I., Gazalov, V.S., & Bukhantsov, K.N. (2019). Regression mathematical model of a two-stage combined electro-technology for high-temperature convective drying and ozone-air treatment of grain. *Tractors and Agricultural Machinery*, 1, 81–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-1-81-95>
- Троцкая, Т.П., Литвинчук А.А., Миронов, А.М., Грищук, В.М., & Сороко, О.Л. (2008). Озонная технология сушки зерна. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 2б, 20.
- Trotskaya, T.P., Litvinchuk, A.A., Mironov, A.M., Grishchuk, V.M., & Soroko, O.L. (2008). Ozone technology for grain drying. *Food Industry: Science and Technology*, 2b, 20. (In Russ.)
- Штанько, Р. И. (2000). *Электроозонаторная установка для сушки зерна* [Дисс. к. тех. наук]. Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия.
- Shtanko, R. I. (2000). *Electro-ozone installation for grain drying* [Ph.D. dissertation in technical sciences]. Azov-Black Sea State Agroengineering Academy. (In Russ.)
- Baskakov, I.V., Orobinsky, V.I., Gievsky, A.M., Gulevsky, V.A., & Chernyshov, A.V. (2022). Grain disinfection with ozone-air mixture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1043, Article 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012037>
- Baskakov, I.V., Orobinsky, V.I., Gulevsky, V.A., Gievsky, A.M. & Chernyshov, A.V. (2020). Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 488, Article 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012007>
- Baskakov, I.V., Orobinsky, V.I., Gulevsky, V.A., Gievsky, A.M., & Chernyshov, A.V. (2020). Studies of the ozonation process when drying grain. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 422, Article 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012009>
- László, Z., Hovorka-Horvath, Z., Beszedes, S., Kertesz, S., Gyimes, E., & Hodur, C. (2008). Comparison of the effects of ozone UV and combined ozone/UV treatment on the color and microbial counts of wheat flour. *Ozone: Science and Engineering*, 30, 6, 413–417. <https://doi.org/10.1080/01919510802474607>
- Pereira, A. M., Faroni, L. R. D., Sousa, A. H., Urruchi, W. I. & Paes, J. L. (2008). Influência da temperatura da massa de grãos sobre a toxicidade do ozônio a *Tribolium castaneum* [Influence of grain mass temperature on ozone toxicity to *Tribolium castaneum*]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 493–497.
- Rozado, A.F., Faroni, L.R.D., Urruchi, W.M.I., Guedes, R.N.C., & Paes, J.L. (2008). Aplicação de ozônio contra *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum* em milho armazenado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 282–285. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000300009>
- Prudente, A.D., & King, J.M. (2002). Efficacy and safety evaluation of ozonation to degrade aflatoxin in corn. *Journal of Food Science*, 67(6), 2866–2872. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08830.x>