



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Свеженцов А.И. и др. Корма и кормление сельскохозяйственной птицы: Монография [Текст] / А.И. Свеженцов, Р.М. Урдзик, И.А. Егоров. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2006. – 384 с.
2. Селянский В.М. Анатомия и физиология сельскохозяйственной птицы 2-е изд. М.: Колос, 1972.
3. Богданов Г.А. Кормление сельскохозяйственных животных. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 624 с.
4. Экспертиза кормов и кормовых добавок: учеб.-справ. пособие [Текст] / К.Я. Мотовилов, А.П. Булатов, Н.Н. Ланцева и др. – Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2004. – 303 с.
5. Шенцов К.С. Рекомендації щодо спрямованого вироцуння, утримання і відгодівлі водоплавної птиці, 2006.
6. http://web-fermer.ru/publ/fofor_v_pitanii_zhivotnykh/1-1-0-40
7. <http://www.sorosol.ru/articles/show-1.htm>
8. ГОСТ Р 51899-2002. Комбикорма гранулированные.

Надійшла 06.2012

Адрес для переписки:

вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039



УДК 631.563.2:546.214:542.943.5+537.562:537.568

К.Н. БУХАНЦОВ, младший научный сотрудник отдела электроэнергетики
ГНУ Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ ЗЕРНА, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭЛЕКТРОАКТИВИРОВАННЫЙ ВОЗДУХ РАЗНОГО СОСТАВА (обзор, часть 1)

В статье предложено разделение способов сушки по видовому составу содержащихся в теплоносителе продуктов газового разряда. Проанализированы основные показатели эффективности и недостатки технологий снижения влажности зерна, в которых в качестве агента сушки используется воздух, прошедший обработку в газовых разрядах (в коронном, барьерном) и имеющий разный состав электроактивированных частиц (озон, аэроионы или их смеси). Оценены возможности применения рассматриваемых электрофизических способов удаления влаги в производственных условиях и сделан вывод о том, что из них наиболее выгодно использование озонозооной сушки.

Ключевые слова: озонозооная смесь, озон-аэроионная воздушная смесь, аэроионно-воздушная смесь, теплоноситель, сушка зерна, зерносушилка, обеззараживание зерна, барьерный озонатор, коронный озонатор, энергетические затраты, влажность зерна.

The author offers the idea of separation of drying methods according to the composition of the gas discharges which are contained in the coolant heat-carrying agent. Both the main efficiency indexes and some disadvantages of the methods of grain humidity decreasing have been analyzed, where as a drying agent is used air treated in the gas discharges (in the corona or barrier) and having the different composition of electro-activated particles (ozone, air-ions, and their mixtures). The potentialities of using these electro-physical methods of humidity removing in the production conditions are evaluated and it is concluded that it is the most profitable to use the ozone-air dryer.

Key words: ozone-air mixture, ozone air ion mixture, air ion mixture, heat-carrying agent, grain drying, grain dryer, grain disinfection, barrier ozonizer, corona ozonizer, expenditure of energy, grain humidity

В большинстве регионов России природно-климатические условия ведения сельскохозяйственного производства (в отрасли растениеводства) ежегодно ставят агропромышленные предприятия перед необходимостью искусственно снижать влажность значительной части урожая зерновых культур (до 30-45%) собираемого в стране. Использование процесса сушки в системе операций послеуборочной обработки зерна обеспечивает его количественную и качественную сохранность в течение длительного времени. Однако, известные технологии снижения влажности зерновых материалов, применяемые в АПК, а также на предприятиях хранения и переработки зерна, имеют довольно много существенных недостатков, которые для повышения эффективности зернового производства необходимо обязательно устранять.

К основным проблемам использования способов тепловой конвективной сушки зерна в практике сельскохозяйственного производства и смежных с

ним отраслей промышленности относятся высокие удельные энергозатраты на процесс, значительная неравномерность удаления влаги по толщине слоя зерна и по объему каждой отдельной зерновой частицы, а также высокий риск снижения технологических, посевных или кормовых свойств зерна из-за перегрева.

Существенными недостатками практического применения технологий сушки зерна активным вентилированием является низкая интенсивность и высокая продолжительность процесса влаговсёма, неравномерность удаления влаги по толщине слоя высушиваемого материала, невозможность применения способов при относительной влажности атмосферного воздуха выше 65% и влажности зернового сырья более 22%, а также порча зерна из-за самосогревания и интенсивного развития вредной микрофлоры.

К наиболее эффективным методам борьбы с перечисленными недостатками способов удаления



влаги из сельхозматериалов относится использование в качестве агента сушки, который продувается через слой сырого зерна, воздуха с измененным в газовом разряде составом и свойствами. Электрически заряженными и химическими активными компонентами электроактивированного воздуха (ЭАВ), которые интенсифицируют процессы тепломассопереноса в зерне, минимизируют энергозатраты на сушку и позволяют сохранить и даже улучшить качество зернового сырья после обработки, являются озон, аэроионы или их смеси. На основе использования этих продуктов газового разряда в составе технологического воздуха, начиная с середины 70-х годов XX века и по настоящее время, учеными было разработано и исследовано большое количество способов снижения влажности зерна [1-12 и др.], однако это привело к тому, что в существующем разнообразии электротехнологий обезвоживания стало сложно ориентироваться, особенно в процессе выбора способов сушки зерна для производственного применения, а также при оценке их преимуществ и недостатков по сравнению с другими известными методами удаления влаги.

Поэтому с целью упорядочения накопленного объема исследований в рамках рассматриваемой обширной группы электрофизических способов сушки (различающихся по составу ЭАВ) и для выполнения оценки их готовности к внедрению в производство, разработаем классификацию этих технологий снижения влажности зерна и проведем анализ их эффективности.

В зависимости от содержания озона и (или) аэроионов все разновидности воздуха, прошедшего обработку в газовом электрическом разряде и используемого для снижения влажности зерна, предложено разделить на три типа агента сушки: **ионизированный воздух**, содержащий преимущественно смесь аэроионов с воздухом; **озонированный воздух**, содержащий электрически нейтральную смесь озона и воздуха и **озоно-аэроионную воздушную смесь**, содержащую в сушильном агенте в разных пропорциях озон и аэроионы (ионы). Эти виды теплоносителей образуют новую обособленную классификационную группу электрофизических способов снижения влажности зерна, реализуемых на базе конвективного способа сушки. Помимо этого выделенные способы обезвоживания зерновых материалов могут быть разделены по уровню нагрева электроактивированного

воздуха еще на три самостоятельные группы способов сушки: активное вентилирование, высокотемпературный конвективный и низкотемпературный конвективный.

Перечисленные признаки классификации использованы нами при разработке классификационной схемы способов сушки зерна, показанной на рисунке 1. Совмещение этой схемы с ранее предложенной классификацией способов сушки озоноздушными смесями [13] позволит сделать новую классификацию более универсальной, выявить на её основе неисследованные или слабо исследованные технологии сушки и даст возможность систематизировать уже известные способы снижения влажности зерна электроактивированным воздухом.

Еще одним из признаков, по которому можно определить принадлежность обработанного в газовом разряде агента сушки, к конкретному типу электроактивированного воздуха, согласно предложенной нами классификации (рис. 1), является конструкция устройств, которые используются в процессе сушки для получения озона и аэроионов. Так, для электросинтеза аэроионо-воздушных смесей применяются ионизаторы, работающие на принципах коронного разряда [3, 14-16 и др.], для выработки озоноздушных смесей – озонаторы объёмного барьерного разряда с электродами, поверхность которых в газоразрядных промежутках полностью или частично покрыта диэлектриком [17-19], а для получения озонозоионных воздушных смесей – используются озонаторы коронного [15, 20] и поверхностного барьерного разряда [17].

Наиболее известные из литературы способы сушки зерна, в которых используются теплоносители, прошедшие обработку в газовом электрическом разряде, разделим на несколько групп (по типам электроактивированного воздуха), согласно предложенной нами классификации, после чего выделим основные технологические режимы обработки зерна и соответствующие им параметры эффективности процессов, и все полученные данные сведём в таблицу 1. Это позволит сравнить между собой разные по составу теплоносителя способы удаления влаги, найти между ними существенные отличия, объяснить необходимость разработки новой классификации и доказать правомерность существования обозначенных в ней самостоятельных групп способов сушки зерна, различающихся по типу ЭАВ.



Рис. 1. Классификация способов сушки зерна электроактивированным воздухом с разным составом продуктов газового разряда.



Таблиця 1

Разделение между собой известных способов сушки зерна электроактивированным воздухом разного состава в соответствии с предлагаемой классификацией

Авторы, организации, период выполнения исследований, источники литературы	Тип генератора озона (аэроионов)	Тип электроактивированного воздуха	Концентрация озона (аэроионов) в агенте сушки, основные режимы обработки, вид способа сушки	Параметры эффективности
Павлык В.А., Тихенький В.И., НПО «Нечерноземагромаш» (1989–1993) [1, 2]	ионизатор коронного разряда	воздух обогащённый аэроионами	концентрация аэроионов $6,54 \cdot 10^{20} - 50 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ активное вентилирование, низкотемпературная конвективная сушка	снижение продолжительности сушки на 38–78%, а энергозатрат более чем на 30%
Голубкович А.В., Шампанова Л.В., ВИМ (1985–1987) [3]	ионизатор коронного разряда	аэроионово-воздушная смесь	концентрация аэроионов $30 \cdot 10^9 - 500 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, высокотемпературная конвективная сушка в псевдооживленном слое при $t_{\text{возд.}} = 40 - 100^\circ\text{C}$	снижение продолжительности сушки на 8–15%
Креймерис Й.Б. Литовский НИИМЭСХ (1985-1989) [4]	барьерный озонатор	озоново-воздушная смесь	концентрация озона $5 - 30 \text{ мг/м}^3$, периодическая подача на 1-2 ч в сутки при активном вентилировании	снижение энергозатрат на 12–50%
Троцкая Т.П., Гродненский СХИ – Белорусский НИИМСХ (1981 – 1998) [5, 6]	барьерный озонатор	озоново-воздушная смесь	концентрация озона $0,23 - 10,00 \text{ мг/м}^3$, постоянная подача озона, активное вентилирование или низкотемпературная конвективная сушка	снижение продолжительности сушки на 23–50%
Голубкович А.В., Чижиков А.Г., ВИМ (1998–2005) [7]	барьерный озонатор	озоново-воздушная смесь	концентрация озона $3 - 5 \text{ мг/м}^3$ при активном вентилировании; [$5 - 7 \text{ мг/м}^3$, при низкотемпературной конвективной сушке]	снижение длительности сушки на 18–20% [на 15–18%], энергозатрат – на 16–20% [на 14–15%]
Рудобашта С.П., Нуриев Н.Н., Московский ГАУ им. В.П. Горячкина (1998-2002) [8]	барьерный озонатор	озоново-воздушная смесь	концентрация озона $4 - 12 \text{ мг/м}^3$, низкотемпературная конвективная сушка	снижение энергозатрат на 15–18%, продолжительности сушки на 20–30%
Глуценко Л.Ф., Глуценко Н.А., Гродненский СХИ – Новгородский ГУ (1981–1992) [9, 10]	коронный озонатор	озоно-аэроионово-воздушная смесь	концентрация озона $2 - 10 \text{ мг/м}^3$, активное вентилирование, низкотемпературная конвективная сушка	сокращение продолжительности процесса в 1,2–2,5 раза
Ксёиз Н.В., ВНИПТИМЭСХ (1989 – 1995) [11, 12]	коронный озонатор	озоно-аэроионово-воздушная смесь	концентрация озона $7 - 10 \text{ мг/м}^3$, активное вентилирование	сокращение продолжительности процесса в 1,5–1,7 раза, снижение энергозатрат в 1,7–2,2 раза

Рассмотрим сначала способы снижения влажности зерна, в которых в качестве теплоносителя применяется ионизированный воздух, и оценим перспективу использования этих способов в производстве.

Интенсификация процесса сушки зерна, обусловленная использованием для удаления влаги ионо-воздушных смесей, связана со специфическими реакциями аэроионов и молекул воды, содержащихся в агенте сушки, а также с воздействием ионов на влагу, находящуюся внутри зерна.

Первые изменения свойств воздуха как агента сушки начинаются с момента попадания его в зону газового разряда, воздействие которого, в соответ-

ствии с потенциалами ионизации, приводит к образованию ионов кислорода (O^- , O^+ , O_2^- , O_2^+ и др.), разложению молекул воды на протон H^+ и гидроксильную группу OH^- , а также к возникновению ионов других газов (H_2^- , H_2^+ , N_2^- , N_2^+ , NO_2^- , NO_2^+ , CO_2^- , CO_2^+ , CO^- , CO^+ и др.). Уже на этом этапе снижается начальное влагосодержание агента сушки (за счёт электродиссоциации молекул воды), что ведёт к повышению скорости удаления влаги из зерна. Кроме того, аэроионы связывают молекулы воды, содержащиеся в воздухе, образуя гидротированные ионы (или кластеры), что способствует уменьшению парциального давления паров воды в теплоносителе и вызывает повышение влагоотдачи с поверхности зер-



на (внешний влагоперенос).

При сушке зерна ионизированным воздухом через слой влажного материала продувается агент сушки, содержащий аэроионы разной полярности. Попадая в слой зерна, аэроионы накапливаются на поверхности зерновых частиц, сообщая им электрический заряд, при этом сами аэроионы практически не проникают внутрь зерновок и заряд сосредотачивается только на их поверхности. Накапливаясь, электрический заряд создает разность электрических потенциалов между поверхностями и внутренними частями зерна, что нейтрализует энергию связей воды с активными центрами сорбции его биополимеров и облегчает выделение влаги на поверхность зерновок. В результате наличия разности потенциалов между центром и поверхностью зерновых частиц внутренняя более прочно связанная влага начинает перемещаться в зону повышенной неоднородности электрического поля, т.е. на поверхность зерна, при этом перемещение влаги под действием электроосмотических сил совпадает по направлению с перемещением влаги под действием градиента влагосодержания, что ускоряет сушку.

Преимуществом способа снижения влажности зерна ионизированным воздухом при активном вентилировании (температура агента сушки составляет 16-25⁰С) является возможность использования воздуха с относительной влажностью более 80%, при этом скорость удаления влаги приобретает максимальные значения [2]. В то время как при активном вентилировании обычным наружным воздухом (без ионизации), сушка зерна до кондиционных параметров возможна только при относительной влажности агента сушки не более 65% [21]. Применение теплоносителя, обогащенного аэроионами, эффективно и при высокотемпературной конвективной сушке, при этом возрастают энергозатраты на процесс, но они не превышают потребления энергии на удаление влаги, которое имеет место при использовании только подогретого воздуха, а продолжительность сушки при этом сокращается на 8-15%, за счёт увеличения интенсивности внутреннего влагопереноса [3].

Достоинством способов сушки зерна ионизированным воздухом является также способность достижения в них высокой интенсивности влагосъёма независимо от состояния слоя высушиваемого материала в процессе обработки. Прежде всего, это относится к возможности реализации процесса в плотном пересыпающемся, «кипящем» и взвешенном слое зерна, а не только в наиболее распространенных плотном подвижном, малоподвижном и стационарном слое [21].

Основной причиной высокой эффективности аэроионо-воздушной сушки при неплотных состояниях слоя зерна является свободное «прилипание» практически всех ионизированных частиц, содержащихся в теплоносителе, к поверхности зерновок и к молекулам воды (связывание ионами молекул влаги в воздухе), что обеспечивает отсутствие технологических потерь аэроионов (кроме рекомбинации при транспортировании) и, тем самым, дополнительно интенсифицирует внешний и внутренний влагоперенос в частицах материала и увеличивает количество

влаги, удаляемой с обработанным теплоносителем (сушильным агентом).

Несмотря на довольно высокую эффективность сушки зерна ионизированным воздухом, практическое использование аэроионов для этих целей связано со многими проблемами. Для любого производственного процесса важное значение имеет поддержание на постоянном уровне заданных соответствующим режимом обработки основных технологических параметров, так как от этого зависит устойчивость технологического процесса и качество конечного продукта. При сушке зерна ионизированным воздухом наиболее сложно обеспечить постоянство именно такого технологического фактора как концентрация аэроионов в рабочем воздухе. Это связано с малой продолжительностью жизни ионов, которая составляет от долей секунды до нескольких десятков секунд и обусловлена высокой скоростью их рекомбинации до нейтрального по заряду состояния, что приводит к неустойчивому протеканию технологического процесса и к нестабильности параметров его эффективности (энергозатрат, продолжительности сушки и сохранности качества зерна).

Стабильность концентрации аэроионов в воздухе находится в сильной зависимости от исходных (до входа в ионизатор) характеристик воздушной среды: температуры, влажности, атмосферного давления, фонового количества аэроионов, химического состава, загрязненности (запыленности) и др. Даже небольшие изменения отдельных начальных параметров воздуха способны вызывать увеличение или уменьшение (последнее чаще) количества синтезируемых аэроионов и сокращение их продолжительности жизни, что снижает интенсивность сушки и качество зерна, ухудшает режим работы ионизаторов. Особенно интенсивно процесс рекомбинации аэроионов происходит при транспортировании по воздуховодам от генератора ионов до ввода в технологическую камеру сушки. Выделяют два направления потерь аэроионов: за счет ухода (диффузии) на стенки транспортного канала и из-за объемной рекомбинации [22].

Полностью исключить явление рекомбинации аэроионов нельзя, но ряд технико-технологических мероприятий по его уменьшению предпринимать необходимо для того, чтобы можно было осуществлять процесс сушки зерна ионизированным воздухом. Сокращение диффузии ионов на стенки воздухопроводов производится за счет изготовления их из специальных диэлектрических материалов с высоким удельным сопротивлением ($10^{13} - 10^{18}$ Ом) и поверхностной активностью, соответствующей накоплению поверхностного заряда со средней плотностью $10^{-10} - 10^{-15}$ Кл/см² [22, 23]. Такой способ борьбы с потерями аэроионов в условиях агропромышленного комплекса малоприменим, так как основное количество сушильных установок изготавливается из металла и их переоснащение пластиковыми воздуховодами потребует больших затрат. Кроме того, при открытом исполнении зерносушилок в агрессивных условиях внешней среды полимерные материалы быстро стареют, теряют свои первоначальные свойства и разрушаются. Пластмассовые конструкции



плохо воспринимают механические повреждения, ударные и другие нагрузки, которых избежать в производственных условиях нельзя, то есть по прочности они также значительно уступают металлическим воздуховодам. Полимерные материалы с необходимыми диэлектрическими свойствами для транспортирования аэроионов с малыми потерями очень дороги, нетехнологичны при механической обработке и изготовлении и требуют специального оборудования, из-за чего их использование в сельхозмашиностроении ограничено. Поэтому в среднесрочной перспективе альтернативы металлическим конструкционным материалам при изготовлении воздухопроводов зерносушильных установок нет.

Способами сокращения потерь аэроионов, вызываемых объёмной рекомбинацией, являются: уменьшение длины воздухопроводов, по которым прокачивается ионизированный воздух (т.е. максимально близкое расположение ионизатора к технологической камере суши), снижение сопротивления потоку и интенсивности перемешивания воздуха при транспортировании за счёт уменьшения количества поворотов, разветвлений, сужений и расширений воздухопроводов, ограниченное применение в конструкциях воздушных каналов заслонок, рассекателей, смесителей и турбулизаторов потока, сеток и др., использование небольших скоростей транспортирования ионизированного воздуха.

Наиболее распространённым вариантом внедрения любых новых технологий, в том числе суши, является использование их на базе промышленно выпускаемого оборудования, уже получившего широкое распространение в производстве, при минимальном изменении (доработке) конструкций известных установок. Реализация способа сушки зерна ионизированным воздухом в существующих зерносушилках [21] с учётом применения перечисленных методов снижения объёмной рекомбинации аэроионов потребует большой реконструкции сушильного оборудования, что очень дорого, поэтому промышленное использование данной технологии снижения влажности зерна в ближайшей перспективе не произойдёт.

Описанные приёмы, позволяющие уменьшить все виды рекомбинации ионов в агенте суши, в полной мере могут быть осуществлены только в специально спроектированных опытных образцах сушилок разных производительностей или небольших лабораторных установках, служащих для проведения экспериментальных исследований в научных целях. Кроме того, имеется опыт промышленного внедрения аэроионной суши зерна на базе бункеров активного вентилирования [2], который основан не на усовершенствовании конструкции установки и технологических приёмов, снижающих рекомбинацию, а на использовании очень высоких концентраций аэроионов в воздухе, которые значительно (на 10-11 порядков) превышают минимально необходимую концентрацию для обеспечения интенсивного протекания процесса сушки [3]. Это приводит к повышению удельных энергозатрат на удаление влаги из зерна и снижению срока службы ионизаторов воздуха из-за эксплуатации их на критических режимах, но при

этом компенсируются все виды потерь аэроионов при транспортировании и вводе в слой зерна при обеспечении относительной стабильности сушки зерна.

Обрабатывая зерновой материал ионизированным воздухом, можно выполнять его обеззараживание от вредной микрофлоры одновременно с процессом удаления влаги. Применение способа осложняется тем, что воздействие аэроионов на микроорганизмы способно вызывать как стимулирование, так и ингибирование их жизнедеятельности. Эффективность процесса зависит от используемой концентрации ионов в воздухе и от продолжительности обработки аэроионо-воздушной смесью содержащейся в зерне фитопатогенной микрофлоры [14, 22]. Концентрации аэроионов, вызывающие ускоренный рост бактерий и плесневых грибов, паразитирующих на зерне, колеблются в значительных пределах, в которые входят и величины концентраций, применяемых для сушки зерна. Устойчивый эффект подавления развития патогенной микрофлоры в зерне наблюдается только при высоких концентрациях аэроионов и имеет свою специфику. В зависимости от вида вредных микроорганизмов, угнетение жизнедеятельности каждого из них происходит при разных концентрациях ионов в воздухе. Зерно всегда заражено одновременно несколькими видами вредной микрофлоры, в связи с чем применяемые для сушки и обеззараживания концентрации аэроионов могут колебаться в широком диапазоне величин, поэтому при выборе концентраций необходимо задаваться наибольшими их значениями для данной совокупности микроорганизмов, исходя из того, чтобы произошло максимально полное, согласно требованиям стандартов, обеззараживание зерна [14].

Как основной технологический параметр, существенно влияющий на качество обрабатываемого материала и на интенсивность процесса удаления влаги, концентрацию ионов в агенте суши необходимо строго контролировать и поддерживать на постоянном уровне. Существует довольно много способов и устройств для измерения концентрации аэроионов в газовой фазе [14, 24], но они неудобны в эксплуатации, громоздки, дорогостоящи, непригодны для размещения на постоянной основе в воздухопроводах зерносушильных установок, не могут нормально работать в непрерывном режиме в производственных условиях, имеют низкую точность измерений, их промышленное применение ограничено малым сроком службы, низкой надёжностью, необходимостью частого технического обслуживания и поверочных работ. Кроме того, все еще не сформулированы базовые понятия, прописанные и утверждённые в стандартах, о том, какие частицы следует относить к аэроионам (атомы и молекулы каких газообразных химических веществ, в каком диапазоне подвижности, каких размеров и массы и др.), не сформированы основные устоявшиеся признаки классификации аэроионов (по способу образования, по подвижности, по продолжительности жизни, по величине заряда, по эффективности технологического использования или др.), а это также не позволяет окончательно сложиться приборной измерительной



базе и способам измерения содержания в воздухе этого вида электроактивированных частиц. Не разработано стандартизированных методик и технических средств (надёжных и точных) для определения концентрации аэроионов в воздушной среде, которые были бы эталонными для градуировки и поверки существующих промышленно производимых счетчиков и измерителей концентрации аэроионов, а также нахождения производительностей и выполнения настроек на режим работы ионизаторов, которые можно было бы использовать в производстве и для научных исследований [24, 25].

Перечисленные недостатки способов сушки зерна электроактивированным воздухом, обогащенным аэроионами, являются серьезным препятствием для их внедрения в сельскохозяйственное производство, поэтому, даже в среднесрочной перспективе, данный вид электротехнологий для снижения влажности зерновых материалов широкого практического использования не получит.

Теперь рассмотрим обширную группу способов сушки, в которых сырое зерно обрабатывается озонородушными смесями [13]. Эффективность этих технологий по интенсивности удаления влаги и сокращению удельных энергозатрат на процесс (по сравнению с классическими способами сушки) в ряде случаев ниже, чем при воздействии на зерновой материал ионизированным воздухом (таблица 1), но зато они не имеют недостатков, свойственных способам аэроионо-воздушной сушки зерна и препятствующих их хозяйственному использованию.

Обогащение озоном воздуха, имеющего температуру окружающей среды или слабо подогретого, также как и в случае применения аэроионов, позволяет снизить его относительное влагосодержание [7] за счет способности молекул озона связывать вокруг себя молекулы воды в виде гроздьев [6]. Эта особенность озона в составе озонородушных смесей (ОВС) обеспечивает увеличение их влагопоглощительной способности и, при использовании в качестве агента сушки, интенсифицирует процесс удаления из зерна влаги [6-8].

Кроме того, при продувании озонированного воздуха через слой влажного зерна, его частицы активно поглощают озон из газовой фазы, который растворяется во влаге зерна и взаимодействует с его сухим веществом.

Насыщение озоном воды, содержащейся внутри частиц зернового материала, разрушает и (или) ослабляет ее связи с биополимерами зерна и с соседними молекулами воды, удерживающимися вокруг активных центров сорбции сухого вещества зерна, в двойном слое, что обеспечивает снижение удельных энергозатрат на разрыв этих связей и на удаление избыточной влаги, а также интенсифицирует ее выделение из внутренних тканей на поверхности зерна. Кроме того, озон изменяет теплофизические свойства связанной воды в зерне: уменьшает теплоемкость, снижает удельную теплоту парообразования, что способствует сокращению энергопотребления на процесс сушки. Результатом взаимодействия озона с организмом зерна (с его сухим веществом и биологической системой) является снижение равновесной

влажности последнего и возникновение в зерновых частицах биоадаптивных реакций, сопровождающихся выделением внутри них тепла и увеличением движущих сил внутреннего массопереноса (градиента температуры и коэффициента массопроводности зерна), что обеспечивает интенсификацию удаления влаги и снижение энергетических затрат на процесс [6, 26-27].

Сушка зерна может осуществляться при разных температурах нагрева озонированного воздуха, в зависимости от которых способы снижения влажности подразделяются на активное вентилирование озонородушной смесью [4, 6-7], низкотемпературную конвективную (подогрев теплоносителя не выше 35-40⁰C) [7-8] и высокотемпературную технологии сушки зерна ОВС. При этом известные экспериментальные исследования проведены только для первых двух групп способов удаления влаги. О существовании и возможности реализации способа высокотемпературной конвективной сушки зерновых материалов ОВС говорят только два патента на изобретения одних авторов, найденные при проведении анализа и разработке классификации технологий обезвоживания зерна и семян сельскохозяйственных культур в озонированной воздушной среде [13]. Ограничение температуры нагрева озонородушных смесей 35-40⁰C связано с тем, что превышение этого порога температур активизирует развитие процессов термического разложения озона в ОВС, которые значительно усиливаются при дальнейшем подогреве теплоносителя и приводят к снижению эффективности процессов удаления влаги. Это объясняет, почему способ высокотемпературной конвективной сушки зерна озонированным воздухом до настоящего времени не исследован.

Способы снижения влажности зерна озонородушными смесями применяются, в основном, для обработки сыпучих зерновых материалов, находящихся в плотном стационарном или плотном малоподвижном слое, из которых поточные технологии сушки зерна ОВС, реализуемые в установках непрерывного действия, были разработаны только в последние 10-12 лет [13, 28].

Ограничение использования озонированного воздуха только для обработки зерна в разных типах плотного слоя связано с тем, что при других состояниях слоя (кипящий, падающий, взвешенный) возникают большие потери действующего вещества (озона) с отработанным агентом сушки, что снижает эффективность технологического процесса (уменьшает его потенциал интенсификации и энергосбережения) из-за неполного усвоения количества озона, подаваемого во время сушки в зерновой материал, и создает серьезную опасность для здоровья обслуживающего персонала и экологии окружающей среды из-за выбросов высоких концентраций озона (выше ПДК, установленного в ГОСТ 12.1.005-88) в воздух рабочей зоны и в атмосферу.

На взаимодействие озона с зерном, также как и на интенсификацию обусловленных им тепломассообменных процессов требуется значительно больше времени, чем то, которое электроактивированный воздух находится в неплотных состояниях слоя обра-



батываемого материала, и то, которое необходимо для проявления ускорения процесса сушки в случае использования аэроионов. Как раз поэтому, для удаления влаги с помощью ОВС применяются плотные состояния слоя.

При озоновоздушной сушке происходит фильтрация озонированного воздуха через межзерновое пространство плотного слоя влажного зерна, которая обеспечивает равномерное обтекание и более продолжительный по времени контакт частиц высушиваемого материала с озонсодержащей газовой средой, что способствует максимально полному поглощению зерном озона из сушильного агента и интенсифицирует в нем процессы выделения и удаления прочносвязанной внутренней и свободной поверхностной влаги.

Озон (O_3) является одним из сильнейших природных окислителей, обладающих высокой реакционной способностью по отношению к большинству существующих химических веществ, материалов и биологических объектов [17-19, 29]. Он активно применяется в сельскохозяйственном производстве для обезвреживания (обеззараживания) зерновых материалов и другой продукции АПК от содержащихся в них вредных химических веществ естественного и антропогенного происхождения (микотоксины, трипсины, удобрения, соединения тяжелых металлов, пестициды, гербициды и др.) и биологических объектов (плесневые грибы, бактерии, дрожжи, насекомые и др.) за счет их уничтожения и (или) разрушения до химически безопасных для роста, развития и воспроизводства живых организмов (человек, животные, растения и др.) соединений [15, 25, 29-30]. Следует также отметить, что обеззараживание зерна и семян может происходить как самостоятельный технологический процесс, так и совмещенно с процессом сушки.

Озон в смеси с воздухом при определенных концентрациях и продолжительностях обработки может частично или полностью подавлять жизнеспособность зерна, вызывая сначала ухудшение его посевных и технологических свойств, а затем приводя к стерилизации. Поскольку каждое зерно (семя) является живым организмом, обладающим природной антиоксидантной защитой, до определенной степени обеспечивающей устойчивость семян и растений к повреждениям, наносимым воздействием разнообразных окислителей (свободных радикалов, озона, кислорода, солей фтора, хлора и др.), содержащихся в обычных условиях в почве, воде и воздухе окружающей среды, то эта его функция иммунитета (защиты от процессов окисления) объясняет, почему порог концентраций O_3 , вызывающих гибель растительного организма, является достаточно высоким и составляет от нескольких десятков до нескольких тысяч грамм озона на кубический метр воздуха [29]. Учитывая вышесказанное и сравнивая с данными, приведенными в таблице 1, становится видно, что числовые диапазоны концентраций озона в ОВС, которые используются в известных способах сушки и обеззараживания зерна, не являются опасными для его репродуктивных свойств и других показателей качества.

Одновременно с положительными технологическими явлениями и эффектами, обусловленными высокой электрохимической активностью озона и проявляющимися при взаимодействии его с биологическими организмами, озон представляет собой большую опасность для здоровья людей (по данным ГОСТ 12.1.005-88) и экологии при выбросах отработанного технологического воздуха с высоким остаточным содержанием O_3 в воздух рабочей зоны и атмосферу [28].

Из таблицы 1 можно видеть, что концентрации озона в ОВС, используемой в качестве теплоносителя, на один-два порядка больше ПДК (согласно ГОСТ 12.1.005-88). Если при удалении влаги из зерна, находящегося в толстом стационарном слое, концентрация озона в отработанном агенте сушки можно поддерживать за счет его поглощения материалом [4, 6-7] на уровне, разрешенном нормативами, то в случае поточной сушки, когда слой зерна более тонкий и при обработке перемещается, не весь озон усваивается зерном, из-за чего его содержание в воздухе на выходе процесса превышает допустимые значения. В связи с чем избыток остаточного озона необходимо искусственно разлагать, снижая концентрацию O_3 в теплоносителе до безопасного уровня.

Известными способами, которые применяются в промышленных установках обработки зерна для утилизации озона в отработанном технологическом воздухе, являются: разложение O_3 нагревом ОВС [28] и облучением ультрафиолетовым излучением [17] и разрушение O_3 на катализаторах [29]. Использование этих способов решает экологическую проблему выбросов озона с агентом сушки в атмосферу и позволяет расширить производственное применение технологий послеуборочной и предпосевной обработки зерна озоновоздушными смесями.

Еще одним преимуществом способов сушки зерна электроактивированным воздухом, обогащенным озоном, является то, что в них обеспечивается постоянство величины концентрации озона в агенте сушки при транспортировании его от озонатора до места ввода в слой обрабатываемого материала по системе воздухопроводов любой длины и конфигурации, включающей различные устройства управления расходом потока теплоносителя.

Это связано с тем, что озон в смеси с воздухом, представляет собой довольно устойчивое химическое соединение с длительным периодом разложения [17, 19], значительно превышающим время транспортирования ОВС к высушиваемому материалу. Устойчивость озона обеспечивается безопасной для его жизнеспособности, как химического вещества, величиной технологических параметров, таких как температура нагрева, относительная влажность, запыленность и давление, озонированного воздуха, применяемого в качестве сушильного агента в процессах активного вентилирования и низкотемпературной конвективной сушки зерна [6-8].

Стабильность концентрации озона в воздухе на выходе из озонатора, как и в случае получения аэроионов, довольно сильно зависит от исходных параметров воздушной среды, поступающей на обработку в барьерный разряд. Однако эта зависимость не



настолько критична для процессов образования и разложения озона в озонаторе, а также при его

транспортировании, по сравнению с аналогичными процессами синтеза и рекомбинации ионов в газах.

(Продолжение в № 4 2012)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Е. Исследование процесса сушки семян зерновых в ионизированной воздушной среде/ А.Е. Иванов, В.А. Павлык// Интенсификация механизированных работ в земледелии Нечернозёмной зоны РСФСР: Сб. науч. тр./ НИИПТИМЭСХ НЗ РСФСР. – Ленинград, 1990. – Вып.56. – С.85-89
2. Тихенький В.И. Методы и средства повышения эффективности процесса сушки семян при электроразрядном воздействии на поток воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ В.И. Тихенький. – СПб.-Пушкин: НПО «Нечернозёмгазромаш» РАСХН, 1993. – 16с.
3. Голубкович А.В. Влияние ионизированного воздуха на массоперенос в зерне/ А.В. Голубкович, Л.В. Шампанова// Научно-технический бюллетень ВИМ. – 1986. – Вып.65. – С.26-29
4. А.с. №1630661 СССР, МКИ А01 F25/08. Способ сушки семян зерновых культур/ И.Б. Креймерис, К.Ц. Трюкас, В.А. Трюкене (Литовский НИИМЭСХ, Литовский НИИ животноводства и ветеринарии). – №4659861/13, заявл.: 10.02.1989, опублик.:28.02.1991// БИПМ – 1991. – №8.
5. А.с. №1095899 СССР, МКИ А01 F25/08. Способ сушки семян зерновых культур/ Н.А. Глуценко, Л.Ф. Глуценко, Т.П. Троцкая (Гродненский СХИ). – №3355297/30-15, заявл.:04.09.1981, опублик.:07.06.1984// БИ. – 1984. – №21.
6. Троцкая Т.П. Электроактивирование процессов сушки растительных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02/ Троцкая Таисия Павловна. – М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 1998. – 31с.
7. Голубкович А.В. Сушка семян и зерна озono-воздушной смесью/ А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков// Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – №1. – С.37-40
8. Нуриев Н.Н. Низкотемпературная сушка зерна озонированным воздухом/ Н.Н. Нуриев, С.П. Рудобаита// Повышение эффективности функционирования систем электроэнергетики сельского хозяйства: Сб. науч. тр./ МГАУ им. В.П.Горячкина. –М., 2001. – С.7-13.
9. Глуценко Л.Ф. Интенсификация процессов пищевых и сельскохозяйственных производств озонозооными смесями/ Л.Ф. Глуценко, Н.А. Глуценко. – Великий Новгород: Новгородский ГУ им. Ярослава Мудрого, 2003. – 151с.
10. Глуценко Л.Ф. Использование электроактивированного воздуха (ЭАВ) для сушки биологических объектов/ Л.Ф. Глуценко, Н.А. Глуценко// Электронная обработка материалов. – 1987. – №2. – С.73-75
11. Патент №2065262 РФ, МПК А01 F25/08. Способ сушки семян зерновых культур/ И.Ф. Бородин, Н.В. Ксёэнз, А.В. Гореленко, А.С. Ерешко, В.А. Волкова (ВНИПТИМЭСХ). – №93021223/13, заявл.: 23.04.1993, опублик.: 20.08.1996// БИПМ. – 1996. – №23.
12. Ксёэнз Н.В. Пути снижения энергоёмкости процесса сушки семян зерновых культур/ Н.В. Ксёэнз// Технологические комплексы, машины и оборудование для механизации производственных процессов в полеводстве: Сб. науч. тр./ ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград: ПМГ ВНИПТИМЭСХ, 1994. – С.185-190
13. Буханцов К.Н. Введение классификации способов сушки зерна озонозооными смесями и определение перспективных направлений их развития/ К.Н. Буханцов// Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 3-й Международ. науч.-практ. конференции в рамках 13-й Международ. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2010» (г. Ростов-на-Дону, ВЦ «ВертолЭкспо», 4-5 марта 2010 г.). – Ростов-на-Дону: Ростовская ГАСХМ – Донской ГТУ, 2010. – С.107-111
14. Чижевский А.Л. Аэроионизация в народном хозяйстве/ А.Л. Чижевский. – М.: Госпланиздат, 1960. – 758с.
15. Болога М. К. Электроантисептирование в пищевой промышленности/ М. К. Болога, Г.А. Литинский; Под ред. И.А. Рогова. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 182с.
16. Ахмедов О.Т. Электрокоронная ионизация сушильного агента/ О.Т. Ахмедов, А.Ж. Исаков, Х.М. Муратов// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – №12. – С.18
17. Лунин В.В. Физическая химия озона/ В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. – М.: Изд-во МГУ, 1998 – 480с
18. Современные конструкции озонаторов. Обзорная информация/ С.С. Баранов, А.А. Орлов, В.И. Семёнов, М.Г. Лейбовский// Серия: ХМ-1. Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение. – М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1984. – 34с.
19. Вигдорович В.Н. Проблемы озонпроизводства и озонобработки. И создание озоногенераторов второго поколения/ В.Н. Вигдорович, Ю.А. Исправников, Э.А. Нихаде-Гавгани. – М.(Шатура) – СПб.(Колпино): Предприятие «Экоинформсистема» и Научно-внедренческое предприятие «Озонит», 1994. – 112с.
20. Патент №1726918 СССР, МПК 5 F24 F3/16. Устройство для озонирования воздуха/ Н.В. Ксёэнз, А.П. Крамаренко, В.Н. Тимошенко (ВНИПТИМЭСХ). – №4808404/29, заявл.: 22.02.1990, опублик.: 15.04.1992// БИПМ. – 1992. – №14.
21. Сакун В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зелёных кормов/ В.А. Сакун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1974. – 216с.
22. Глуценко Н.А. Основы теории и практика электроаэрации растворов в пищевой биотехнологии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12/ Н.А. Глуценко. – М.: МТИПП, 1988. – 44с.
23. А.с. № 879122 СССР, МКИ F16 L9/12. Воздуховод для транспортирования ионизированного воздуха/ Н.А. Глуценко, Г.Ф. Карпов, Л.Ф. Глуценко (Могилёвский технол. ин-т). – №2874009/29-08, заявл.:22.01.1980, опублик.:07.11.1981// БИ. – 1981. – №41.
24. Лившиц М.Н. Аэроионизация. Практическое применение/ М.Н. Лившиц. – М.: Стройиздат, 1990. – 168с.
25. Ксёэнз Н.В. Электроактивированные среды в технологиях сельскохозяйственного производства. Монография/ Н.В. Ксёэнз, Б.П. Чёба. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2011. – 278с.
26. Голубкович А.В. Эффективность применения озонозооных смесей в процессах сушки зерна/ А.В. Голубкович, Ю.Н. Выговский, Н.Ю. Выговская, А.Н. Малов// Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии: материалы 26-го всероссийского семинара (г. Москва, Хим. факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 18 декабря 2003г.). – М.: Изд-во «Университет и школа», 2003. – С.67-86
27. Пахомов В.И. Двухэтапный комбинированный способ высокотемпературной сушки зерна (Часть 2) / В.И. Пахомов, К.Н. Буханцов, В.А. Максименко// Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – №1. – С.53-58
28. Патент №2422741 РФ, МПК F26 B3/14. Способ сушки зерновых материалов/ В.И. Пахомов, В.А. Максименко, К.Н. Буханцов (ВНИПТИМЭСХ). – №2010106531/06, заявл.: 24.02.2010, опублик.: 27.06.2011// БИПМ. – 2011. – №18.
29. Кривошшин И.П. Озон в промышленном птицеводстве/ И.П. Кривошшин. – М.: Россельхозиздат, 1979. – 96с.
30. Ксёэнз Н.В. Электроозонирование воздушной среды животноводческих помещений. Методические рекомендации/ Н.В. Ксёэнз; Под науч. ред.: И.Ф. Бородина. – Зерноград: ПМГ ВНИПТИМЭСХ, 1991. – 172с.

Поступила 29.07.2012

Адрес для переписки:

347740 ул. им. Ленина, 14, г.

Зерноград Ростовская область, Российская Федерация
тел./факс (863-59) 42-2-80

