Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 537.8:631.17

Теоретические предпосылки способов сушки зерна электроактивированным воздухом

Таранов М.А., Казакова А.С., Егорова И.В., Грачева Н.Н., Руденко Н.Б.

Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ

Аннотация

Сушка зерна – это энергозатратный, длительный и трудоемкий этап подготовки к хранению и переработке. Для ускорения этого процесса используются различные методы. Одним из таких методов является применение электроактивированного воздуха (ЭАВ), полученного в результате высоковольтного электрического разряда. ЭАВ не только эффективно удаляет влагу, но и обеззараживает продукцию, продлевает сроки ее хранения и способствует повышению урожайности.

Исследования показали, что для интенсивной сушки семян методом активного вентилирования наиболее эффективным является циклическое воздействие ЭАВ с концентрацией аэроионов уровне $3,5 \cdot 10^{10}$ $м^{-3}$.

Ключевые слова: СУШИЛКА ЗЕРНА, ЭЛЕКТРОАКТИВИРОВАННЫЙ ВОЗДУХ, ХРАНЕНИЕ, УРОЖАЙНОСТЬ, ВЛАЖНОСТЬ, ОЗОН, НАГРЕВ АГЕНТА СУШКИ, ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ

Сушка зерновых материалов – важный энергоёмкий, продолжительный по времени, трудоёмкий процесс подготовки зерновых культур к хранению и последующей переработке. Для интенсификации указанного процесса применяются различные приёмы и методы. Использование для сушки сельскохозяйственной продукции воздуха, обработанного в высоковольтном электрическом разряде – электроактивированного воздуха (ЭАВ), способствует не только удалению влаги из высушиваемого материала, но и влияет на процессы обеззараживания, увеличение сроков хранения и повышение урожайности сельскохозяйственных культур.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

К способам сушки с использованием ЭАВ следует отнести, согласно предложенной классификации [1], применение озоно-воздушной смеси (содержащей электрически нейтральную смесь озона и воздуха), озоно-аэроионной воздушной смеси (содержащей в сушильном агенте в разных пропорциях озон и аэроионы), аэроионо-воздушной смеси (содержащей преимущественно смесь аэроионов с воздухом).

Впервые влияние ионов воздуха, проходящего через электрический разряд, на живые организмы было замечено А.Л. Чижевским. Сегодня многие ученые занимаются вопросом влияния озона, озоно-воздушных смесей и аэроионов на процесс высушивания зерна.

Существует множество способов сушки материалов с использованием озоно-воздушной смеси (ОВС). В 1989 году в Литовском НИИМЭСХе [2] была разработана озонаторная установка В-2,8-5-3-Л-01. Барьерный озонатор применяли для сушки зерна активным вентилированием озоно-воздушной смесью (ОВС). В вентилируемый закром засыпали 40 т зерна ячменя влажностью 25% (высота насыпи 3 м). Удельная подача воздуха – 150–180 $м^3$/(ч·т), ежесуточное озонирование в течение 1–2 часов в сутки при концентрации озона 5–30 мг/$м^3$. В ненастную погоду воздух подогревался. Эффективность энергосбережения, по сравнению с сушкой активным вентилированием, – до 1,5 раз. Предположения о механизме влияния озона на интенсификацию сушки зерна не выдвигались.

В Гродненском СХИ был разработан способ сушки зерна с применением ОВС. Сушке активным вентилированием подвергались семена зерновых культур влажностью 23–30,5%, температура агента сушки поддерживалась на уровне 20–24 ℃, удельная подача воздуха – 1000–1500 $м^3$/(ч·т). Проведенные эксперименты показали, что скорость сушки с применением ОВС зависит от сорта и вида сельскохозяйственной культуры, от концентрации озона. Скорость сушки семян зерна с применением озона с концентрацией 0,2–10 мг/$м^3$ увеличивается до 1,5 раз [3].

Троцкая Т.П. (Гродненский СХИ) выдвинула свою теорию механизма интенсификации процесса сушки зерна ЭАВ [4, 5]. Согласно этой теории, тепловое воздействие озона в процессе сушки представляет суммарное количество теплоты, выделившееся в результате воздействия озона (1):

$$Q_{озона} = Q_{P_1} + Q_{P_2} + Q_g + Q_b, \quad (1)$$

где Q_{P_1} – теплота как следствие рекомбинации озона в сушильном агенте, Дж;
Q_{P_2} – теплота, выделившаяся в результате рекомбинации озона на поверхности материала, Дж;

Q_g – теплота, полученная в результате реакции дыхания, Дж;
Q_b – энергия, выделившаяся в виде теплоты в результате вторичного преобразования в тканях материала, Дж.

В результате расчетов, опирающихся на вышеизложенную теорию, Т.П. Троцкая получила уравнение плотности потока влаги внутри зерновки при сушке зерна с применением озоно-воздушной смеси (ОВС):

$$j = a_{m_0} \cdot \left(\frac{T_з m_з c_з + Q}{273 m_з c_з}\right)^k \cdot \rho_0 \cdot (\nabla U - \delta \nabla \Theta), \quad (2)$$

где a_{m_0} – коэффициент диффузии влаги при 20 °С, м^2/с;
$T_з$ – температура зерна, °С;
$c_з$ – теплоемкость зерна, Дж/(кг·°С);
$m_з$ – масса зерна, кг;
Q – количество теплоты, выделившееся при распаде озона, Дж;
δ – коэффициент термовлагопроводности, (°С)$^{-1}$.
ρ_0 – плотность (объемная масса) абсолютно сухого материала, кг/м^3;
∇U – градиент концентрации влаги, кг/(кг сух. вещества · м);
∇T – градиент температуры, кг · °С/(кг сух. вещества · м);

В уравнение внутреннего влагопереноса добавлен новый коэффициент диффузии влаги $a_m = a_{m_0} \cdot \left(\frac{T_з m_з C_з + Q}{273 m_з C_з}\right)^k$. Данный коэффициент зависит от тепла, выделившегося при разложении озона, температуры, массы и коэффициента теплоемкости материала.

При разложении озона, согласно теории Т.П. Троцкой, образовавшаяся теплота расходуется на нагрев агента сушки, нагрев поверхности зерновки и увеличение коэффициента диффузии влаги внутри зерновки. Нагрев сушильного агента приводит к увеличению его влагопоглотительной способности. Внутри зерновки поглощенный озон вызывает биохимическую адаптивную реакцию, изменяет структуру покровных тканей, изменяет формы связи влаги с веществом и ослабляет эти связи. В результате создается градиент давления внутри зерновки даже при температуре окружающей среды, что интенсифицирует процесс сушки. В результате сушки зерна с применением ОВС из материала удаляется интенсивнее осмотическая влага. Недостатком модели является отсутствие математического описания влияния озона на физические свойства влаги, содержащейся в агенте сушки.

Голубкович А.В., Чижиков А.Г. (ВИМ) проводили эксперименты по сушке семян сельскохозяйственных культур (пшеница, овес, ячмень) с использованием озонированного воздуха с концентрацией озона 3-5 мг/м^3 при аквтином вентилировании, 5-7 мг/м^3 при низкотемпературной конвективной сушке. Экспериментально подтверждено, что одной из причин интенсификации сушки зерна является повышение температуры поверхности

зерновки на 1–2℃ при распаде на ней озона [6, 7]. Для сушки семян применялось активное вентилирование с подогревом воздуха на 6–8 ℃, использовались семена влажностью до 22%, ОВС концентрацией 3–7 мг/м^3. Снижение энергозатрат достигает 14–20%. Механизмом интенсификации сушки семян, по мнению ученых, является разложение озона в слое с выделением тепла, ориентация диполей воды, биохимический потенциал. По полученной зависимости интенсивности массопереноса внутри зерновки от ее влажности можно сделать вывод, что ОВС эффективно применять для удаления осмотически связанной влаги, т.е. от 15 до 22%.

Ткачев Р.В. (МГАУ) под руководством Бородина И.Ф. исследовал явление электроосмотического удаления влаги из зерна [8]. Был описан механизм электроосмотического влагопереноса [9]. Суть описанного метода состоит в том, что на зерновой слой, через который пропускают озоно-воздушную смесь, накладывают внешнее электрическое поле (ВЭП). Вода, находящаяся в зерне, представляет собой ассоциированную жидкость, т.е. жидкость, в которой полярные молекулы объединены в устойчивые комплексы за счет дипольной и водородной связей. Такие ассоциированные комплексы вызывают увеличение теплоты испарения и уменьшение текучести жидкости. При наложении электрического поля диполи воды занимают в электрическом поле ориентированное положение. Такое положение, отвечающее взаимному отталкиванию одноименных зарядов обоих концов молекул, неустойчиво, что приводит к распаду комплексов, а также к снижению теплоты испарения и увеличению летучести жидкости [9].

Ткачев Р.В. использовал для сушки зерна различные комбинации ВЭП и ОВС [8]. В результате он получил уравнение внутреннего влагопереноса в зерновке с учетом явления электроосмоса:

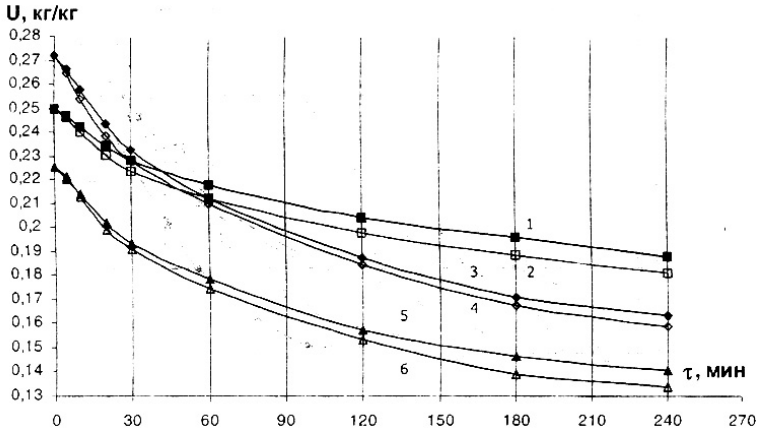
$$\overline{q}_m = -a_m \cdot \rho_c \cdot (\nabla U + \delta \nabla T) - \lambda_\rho \cdot (\nabla P + \nabla P_{ЭО}), \quad (3)$$

где a_m – коэффициент диффузии влаги, м^2/с;
ρ_c – масса абсолютно сухого материала в единице объема сухого материала (плотность сухого зерна), кг;
∇U – градиент влагосодержания, кг/(кг сух.вещества·м);
δ – коэффициент термовлагопроводности материала, $(℃)^{-1}$;
∇T – градиент температуры, ℃/м;
λ_ρ – коэффициент молярного переноса пара, м/ч;
∇P – градиент давления, кг/м^2;
$\nabla P_{ЭО}$ – градиент электроосмотического давления, кг/м^2;

К общепринятым градиентам температуры и влагосодержания Р.В. Ткачевым в выражение величины потока влаги добавлено слагаемое. Оно учитывает влияние ВЭП на внутренний влагоперенос зерновки посредством создаваемого ВЭП давлением. В данной модели нет учета влияния ОВС на агент сушки.

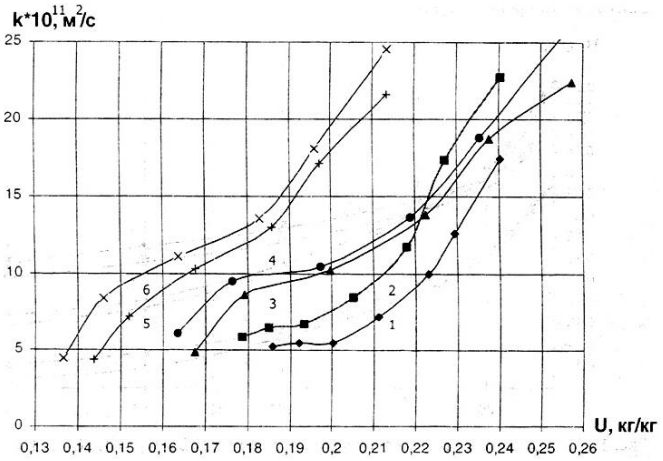
Рудобашта С.П., Нуриев Н.Н. (МГАУ) провели эксперименты по сушке семян зерновых культур различного влагосодержания, толщиной слоев 0,013 и 0,023м. Применялся агент сушки с температурами 20, 25, 30, 35, 40, 45 ℃ и концентрацией ОВС 4–12 мг/м^3. Как показали результаты, чем ниже температура агента сушки, тем больше сокращение длительности процесса сушки [10]. Рудобашта С.П., Нуриев Н.Н. (МГАУ) получили экспериментальным путем кривые зависимости изменения влагосодержания $U(t)$ (рис. 1) и коэффициента массопроводности $k = F(U)_t$ (рис. 2) при сушке озонированным и неозонированным воздухом и различной температуре сушильного агента.

Общий характер функции $k = F(U)_t$ одинаков как при сушке зерна озонированным воздухом, так и неозонированным, что указывает на одинаковость основных механизмов внутреннего массопереноса в этих процессах. Таким образом, повышение температуры материала не может рассматриваться в качестве основного фактора, приводящего к интенсификации процесса сушки зерна ОВС. Озон, воздействуя на оболочку зерновки, повышает её диффузионную проницаемость, что является следствием увеличения коэффициента массопроводности.



1,2 – t = 20 ℃; 3,4 – t = 25 ℃; 5,6 – t = 30 ℃; сушка: 1,3,5 – неозонированным воздухом, 2,4,6 – озонированным

Рис. 1. Кривые сушки первого слоя зерна пшеницы



1,2 – t = 20 ℃; 3,4 – t = 25 ℃; 5,6 – t = 30 ℃; сушка: 1,3,5 – неозонированным воздухом, 2,4,6 – озонированным

Рис. 2. Зависимость $k=F(U)_t$ при сушке зерна пшеницы

Сушка материалов с применением озоно-аэроионных воздушных смесей имеет свои особенности. Учеными установлено, что обогащение воздушного сушильного агента одновременно озоном и аэроионами (отрицательные ионы кислорода, атомарный кислород) повышает его влагопоглотительные, растворяющие и реакционные способности [11]. Такой воздух частично вступает в реакцию с водой в порах зерновки, создавая неустойчивые летучие вещества. Эти вещества, покидая семена, очищают их поры и капилляры и тем самым увеличивают влагопроводимость. Обоснованы концентрации ЭАВ: аэроионы – $3\cdot10^{17}$м$^{-3}$, озон – не менее 8–10 мг/м^3. При указанных концентрациях ЭАВ с добавлением постоянного электрического поля с $E = 100$ В/м продолжительность сушки семян пшеницы сокращается в 1,3–1,5 раза при сушке низкотемпературным воздухом (20 ℃). В доле интенсификации 70% принадлежит ЭАВ и 30 % электроосмосу.

Ксёнз Н.В. (АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ) изучил основные свойства озона, явление образования озона в коронном разряде, использование озона для обеззараживания сельскохозяйственной продукции и животноводческих помещений. Ученым проведены эксперименты по сушке зерна ОВС при различной концентрации озона, различном удельном расходе ОВС, различной влажности агента сушки. В экспериментах использовался ячмень влажностью 29–31% и высотой насыпи 0,21–0,43м. Концентрация озона варьировалась от 2,4 до 10,1 мг/м^3. В результате получили, что применение ОВС при сушке зерновых культур приводит к снижению энергозатрат в 1,7–2,2 раза [12, 13]. Ученым получена математическая модель концентрации озона, подаваемого в зерновой слой в процессе сушки

[13].

Глущенко Л.Ф. и Глущенко Н.А. (НовГУ им. Ярослава Мудрого) изучили механизм влияния озоно-аэроионной воздушной смеси на термолабильные дисперсные материалы. Первое действие озона – это его распад, при котором озон превращается в кислород с выделением тепла, чем обеспечивается дополнительный нагрев материала. Второе действие озона – изменение физических свойств воды: вязкости, плотности и поверхностного натяжения. Озон делает ее менее вязкой, менее плотной, уменьшая поверхностное натяжение воды [14, 15]. Поэтому уменьшается теплоемкость воды и, следовательно, на ее удаление из зерновки требуются меньшие затраты тепла. В этом и состоит механизм интенсификации сушки термолабильных материалов – дополнительный нагрев материала и изменение свойств воды. Сушке озоно-аэроионной воздушной смесью концентрацией 2–10 мг/м^3 подвергались семена зерновых культур влажностью 29–30,3% и высотой насыпи – 0,2 м. Продолжительность сушки с использованием ОВС сократилась в 1,2–2,5 раза. Исследования подтвердили, что существует определенная зависимость между температурой, влажностью, расходом сушильного агента и концентрацией озона в нем. Учеными также получено уравнение внутреннего влагопереноса в зерновке при сушке зерна ОВС [14].

Согласно теории Л.Ф. Глущенко и Н.А. Глущенко (НовГУ им. Ярослава Мудрого) механизм интенсификации сушки термолабильных материалов – дополнительный нагрев материала и изменение свойств воды [15]. Поэтому уравнение внутреннего влагопереноса в зерновке при сушке зерна ОВС будет выглядеть так (3):

$$Q \cdot (\overline{q_v} + \overline{q_{оз}} + \overline{q_b}) = j \cdot r \cdot (1 + Rb) \cdot (K_{оз} + K_b), \quad (3)$$

где Q – тепло, переданное материалу сушильным агентом при нулевой концентрации озона, Вт/м^2;
$K_{оз}, K_b$ – безразмерные параметрические критерии, определяющие влияние активации внутреннего тепло- и массопереноса;
$\overline{q_v}, \overline{q_{оз}}, \overline{q_b}$ – доля энергии, соответственно поглощенной объектом сушки объемно, передаваемой объекту сушки при разложении озона, приобретаемой объектом за счет влияния озона на свойства жидкой фазы объекта;
j – плотность потока влаги, кг/м$^2 \cdot$ ч;
r – коэффициент, учитывающий теплоту фазового перехода, Вт·ч/кг;
Rb – число Ребиндера.

Недостаток модели заключается в отсутствии учета влияния ОВС на агент сушки. Экспериментальные данные получены для зерна 29–30,3%.

Сушка с использованием озона имеет ряд недостатков. Озон – это сильный окислитель и яд. Его применение опасно при превышении предельно допустимой концентрации

(ПДК). Как показывают исследования [16], при длительной обработке озоном сельскохозяйственной продукции в процессе хранения происходит снижение ценных питательных вкусовых веществ (углеводов, витаминов и т.д.). Согласно данным ВОЗ, тропосферный (приземный) озон является веществом беспорогового действия: даже незначительные концентрации этого газа могут отрицательно воздействовать на здоровье человека. Для получения озона применяют барьерные озонаторы, то недостатки этих генераторов озона являются и недостатками способов сушки с применением ОВС: низкий КПД барьерных озонаторов [17, 18]; усложнение конструкции барьерного озонатора из-за необходимости охлаждения электродов и диэлектрических барьеров [19, 20]; высокая вероятность утечки жидкого хладагента, что приводит к выходу из строя озонаторного оборудования (разрядного блока) [20]; загрязнение электродов окислами азота, выделение окислов азота, является причиной образования азотной кислоты, что требует регулярного технического обслуживания [17, 21, 22, 23]; снижение надежности из-за пробоя диэлектрических барьеров [18, 20, 23]; большие габариты и вес озонатора [20]; барьерные озонаторы уступают по надежности работы коронным ионизаторам при длительной эксплуатации.

В последнее время активно изучаются способы сушки зерновых с использованием воздуха, обогащенного аэроионами [24, 25]. Сушка с применением аэроионов способствует снижению длительности процесса и его энергоемкости. Для получения воздуха, содержащего аэроионы, используются ионизаторы на основе коронного разряда (КР) в линиях подготовки агента сушки в бункерах активного вентилирования, напольных и камерных сушилок [26].

В ЧИМЭСХ учеными был разработан способ сушки семян зерновых культур в поле коронного разряда (КР) [27]. В создаваемое поле КР напряженностью $E=(3,5–5,0)\cdot 10^5$ В/м помещают семена и продувают атмосферным воздухом. В результате достигается удаление свободной влаги из семян от 3 до 6%. К недостаткам следует отнести низкую производительность установки, повышенную электрическую опасность для персонала, обслуживающего высоковольтное оборудование в составе установки.

Известен комбинированный способ сушки зерновых материалов [28], при котором к слою зерна подводят постоянный электрический потенциал (разных знаков) и обдувают ионизированным сушильным агентом. По экспериментальным данным были получены графики. Согласно графикам, ионизация сушильного агента с приданием ему электрического

потенциала, противоположного или одинакового с материалом знака, позволяет изменять интенсивность процесса сушки материала в ту или иную сторону. Недостатком способа является сложность реализации в производственных установках и низкая эффективность при сушке зерна небольшой влажности.

Для получения ЭАВ используются различные виды озонаторов [29]. Наиболее распространены сегодня озонаторы барьерного и коронного типа. Коронный разряд прост в конструкции, малогабаритен, неограничен в разрядном промежутке, эффективен для получения аэроионов, концентрации озона малы [29]. Аэроионы из-за малых концентраций и небольшого периода жизни для обслуживающего персонала не опасны.

В 1993 году В.И. Тихеньким под руководством кандидата технических наук В.А. Павлык (НПО «Нечерноземагромаш») была разработана теория кластерообразования [25]. Согласно этой теории, в ионизированном воздухе с присутствием паров воды образуются многомолекулярные ионные комплексы, представляющие собой связанные соединения положительного или отрицательного иона с оболочкой из нейтральных частиц (кластеров). Количество кластеров прямо пропорционально концентрации аэроионов, а время жизни кластеров обратно пропорционально. Объединение молекул воды в кластерные соединения приводит к изменению молекулярной массы паров воды и, как следствие, уменьшению их парциального давления.

Для описания влагомассообменных процессов В.И. Тихеньким получено следующее уравнение:

$$q_m = \beta_m \cdot \left(p_н - \frac{p}{\alpha_{кл}}\right) \cdot \frac{760}{B}, \qquad (4)$$

где q_m – поток влаги из материала, кг/(м · с^2);
β_m – коэффициент влагообмена, отнесенный к разнице парциальных давлений, кг/(м^2·с·Па);
$p_н$ – парциальное давление насыщенных паров воды, Па;
p – парциальное давление паров воды в окружающей среде, Па;
B – барометрическое давление, Па; 760 рт. ст. – нормальное атмосферное давление (1 мм рт. ст.=133,3 Па);
$\alpha_{кл}$ – коэффициент кластерообразования.

Уравнение (4) описано при условии постоянства температуры и скорости агента сушки, то есть, при постоянстве перечисленных характеристик сушильного агента, ионизация воздуха уменьшает его парциальное давление. Разница, возникающая между парциальными давлениями гидродинамического пограничного слоя и агентом сушки,

интенсифицирует процесс удаления влаги с поверхности зерновки. Величина скорости испарения влаги с поверхности зерновки, как следует из соотношения (4), увеличивается с понижением атмосферного давления или увеличением скорости агента сушки. Недостатком данной модели является то, что в ней учитывается только влияние ЭАВ на агент сушки без рассмотрения механизмов внутреннего влагопереноса в самой зерновке. Не уточнено, влага какой формы связи с веществом удаляется из зерновки интенсивнее благодаря предложенному способу сушки.

Голубкович А.В. и Шампановым Л.В (ВИМ) был предложен способ высокотемпературной конвективной сушки зерна в псевдоожиженном слое при $t_{\text{возд}} = 40 - 100℃$ аэроино-воздушной смесью с концентрацией аэроионов $30 \cdot 10^9 - 500 \cdot 10^9$ м$^{-3}$. В результате применения данного способа сушки продолжительность сушки снизилась на 8-15%, что привело к снижению энергозатрат на указанный процесс.

Согласно вышеизложенному, сушка зерновых материалов осуществляется с использованием озона и аэроионов или их смеси с воздухом. Концентрации озона, применяемые для интенсификации процесса, превышают ПДК, что является существенным недостатком. При сушке воздухом, содержащим аэроионы, концентрация аэроионов находится в пределах ПДК, либо превышает эти пределы незначительно. Таким образом, для сушки зерна с применением ЭАВ возможно использование воздуха, насыщенного аэроионами, с предельно допустимой концентрацией на уровне $3{,}5 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$.

Все указанные способы сушки применимы для сушки зерновых материалов влажностью до 30%. По интенсификации сушки зерна способы с использованием воздуха, содержащего аэроионы, не уступают воздействию озонированного воздуха. Сушка зерна аэроионами по эффективности не уступает способам сушки зерна озоном и ОВС, но по степени воздействия использование воздуха, насыщенного аэроионами, приравнивается к низкоэнергетическому воздействию на биологический объект.

Наряду с полученными экспериментальными данными учеными были получены уравнения динамики сушки зерна с применением ЭАВ. В основе каждой математической модели лежит теория влияния озона или аэроионов на высушиваемый материал.

Способы сушки некорректно сравнивать по механизмам воздействия, т.к. для обеспечения процесса применяются разные типы электроактиваторов воздуха и ЭАВ с разным составом (содержит озон, аэроионы или их смеси), который имеет разные технологические

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

свойства. Описанные способы сушки отличаются по режимам обработки, поэтому в рассмотренных работах наблюдаются существенные отличия в показателях эффективности удаления влаги, что не позволяет использовать эти данные в производственных условиях [1, 30].

Механизмы интенсификации сушки зерновых культур с использованием ЭАВ также различаются. Существует три основных направления в объяснении причин интенсификации сушки зерновых с применением ЭАВ: тепловое воздействие озона [5], изменение свойств водяных паров, содержащихся в воздухе [25] и связанной влаги в зерне [9, 14], а так же изменение проницаемости зерновых оболочек [5].

В первом случае [5] при распаде озон превращается в кислород с выделением тепла, чем обеспечивается дополнительный нагрев высушиваемого материала.

Второй случай – изменение свойств воды, содержащейся в воздухе или самой зерновке. Во-первых, в ионизированном воздухе с присутствием паров воды образуются многомолекулярные ионные комплексы – кластеры. Объединение молекул воды в кластерные соединения приводит к изменению молекулярной массы паров воды и, как следствие, уменьшению их парциального давления, что является интенсифицирующим фактором [25]. Количество кластеров прямо пропорционально концентрации аэроионов, а время жизни кластеров – обратно. Во-вторых, озон влияет на физические свойства воды: вязкость, плотность и поверхностное натяжение. Озон делает ее менее вязкой, менее плотной, уменьшая поверхностное натяжение воды, поэтому уменьшается теплоемкость воды и, следовательно, на ее удаление из зерновки требуются меньшие затраты тепла [14]. В-третьих, озон влияет на ориентацию диполей воды, что создает градиент, направленный наружу зерновки, и является причиной значительного уменьшения энергозатрат на удаление даже осмотически связанной влаги [9].

В третьем случае озоно-воздушная смесь, воздействуя на оболочку зерновки, повышает ее диффузионную проницаемость, что увеличивает коэффициент массопроводности [5].

Применяемые ранее способы сушки зерна с электроактивированным воздухом предусматривали циклическую подачу только при использовании ОВС и смеси озона с аэроионами. Способ сушки с циклической подачей аэроионов в высушиваемый зерновой материал ранее не исследовался, поэтому, биологические реакции зерновки для целей

интенсификации технологического процесса использованы не полностью.

Как показано выше, применение озона, ОВС и аэроионов для сушки сельскохозяйственных материалов дает эффективное сокращение продолжительности сушки зерна и снижение удельных затрат. Однако выявленные проблемы ограничивают использование данной технологии в производстве.

С учётом всех перечисленных недостатков рассмотренных способов сушки зерновых материалов, был разработан способ сушки зерна в неподвижном плотном слое с использованием воздуха, нагретого на несколько градусов (активное вентилирование), с циклическим введением в него отрицательных аэроионов постоянной концентрации. Период подачи агента сушки, содержащего аэроионы, составляет 5 минут, период продувания зернового слоя теплоносителем без аэроионов – 5 минут.

В данном способе сушки в период подачи ЭАВ аэроионы, содержащиеся в нем, накапливаются на поверхности зерновок и образуют локальные электрические поля. В результате возникает разность потенциалов между поверхностью и внутренними тканями зерновых частиц, что способствует ослаблению связей внутренней прочно связанной влаги с сухим веществом и более интенсивному выделению ее на поверхность зерна.

При сушке зернового слоя с постоянной подачей воздуха, содержащего аэроионы, образуется разность потенциалов, что выводит систему «зерновка» из состояния равновесия. При исчерпании внутренней энергии «зерновки», необходимой для сопротивления внешнему воздействию, «зерновка» начнет приспосабливаться к внешнему воздействию (фаза возбуждения) и, таким образом, внутренняя влага будет интенсивнее выделяться на поверхность. По мере накопления аэроионов в слое зерна при диссоциации молекул влаги происходит образование малоподвижных ионных комплексов-кластеров, присутствие которых значительно уменьшает эффективность влагопереноса. В системе «зерновка» наступит равновесие, которое достигается в результате аэроионной обработки, т.е. влага на поверхность зерна выделяться не будет.

Для выведения системы «зерновка» из установившегося состояния равновесия, которого «зерновка» достигла при сушке материала ЭАВ, меняем внешнее воздействие – продувание зернового слоя с использованием ЭАВ на продувание зернового слоя теплоносителем без аэроионов. В результате агент сушки снизит величину накопившихся объемных зарядов на поверхности «зерновок», что дополнительно увеличит подвижность ионов и

молекул влаги. Равновесие системы «зерновка» снова смещается и, как следствие, в результате приспособления «зерновки» к новому внешнему воздействию это приведет к интенсивному перемещению внутренней прочно связанной влаги к поверхности. Внешние воздействия необходимо чередовать с указанной периодичностью до достижения зерновым слоем кондиционной влажности.

Анализ различных способов сушки семян, элементов технологий и оборудования, используемых для сушки зерна показал, что для интенсификации процесса сушки семян активным вентилированием целесообразно использовать циклические режимы воздействия электроактивированным воздухом (ЭАВ) с рекомендуемой предельно допустимой концентрацией аэроионов на уровне $3{,}5 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$.

Проведённые теоретические исследования по описанию процессов, происходящих в зерновом слое при его сушке электроактивированным воздухом, не в полной мере раскрывают закономерности процессов и не учитывают энергию, запасённую «зерновкой».

Предлагаемый способ сушки зерна активным вентилированием аэроионо-воздушной смесью раскрывает механизм интенсификации сушки зерна ЭАВ с циклической подачей аэроионов.

Список используемых источников:

1. Буханцов, К.Н. Озон и аэроионы: возможности и проблемы использования для сушки зерна (Часть 1) / К.Н. Буханцов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 11-17.

2. Креймерис, Й. Консервирование влажного зерна пшеницы с применением озона / Й. Креймерис, Ю. Шяштакаус, Е. Вагонене, В. Трюкене // Труды Литовский НИИ механизации и электрификации сельскохозяйственных. – 1986. – Т.18. – С. 49–57.

3. А. с. 1095899 СССР, МКИ3 А 01 F 25/08. Способ сушки семян зерновых культур / Н.А. Глущенко, Л.Ф, Глущенко, Т.П. Троцкая; (Гродненский сельскохозяйственный институт). – №3355297 / 30 – 15; заявлено 04.09.81; опубликовано 07.06.84, Бюл. – 1984. – № 21.

4. Озонная технология сушки зерна / Т.П. Троцкая, А.А. Литвинчук, А.М. Миронов, В.М. Грищук, О.Л. Сороко. // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2008. – № 2(2). – С. 20–25.

5. Троцкая, Т.П. Электроактивирование процессов сушки растительных материалов: автореферат диссертации доктора технических наук: 05.20.02 / Т.П. Троцкая. – Москва, 1998. – 31 с.

6. Сушка семян и зерна озоно-воздушной смесью / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков

// Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – № 1. – С. 37–40.

7. Эффективность применения озоно-воздушных 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. – Москва, 2003. – С.67–86.

8. Ткачев, Р.В. Электроактивирование процесса сушки семян: диссертация кандидата технических наук: 05.20.02 / Р.В. Ткачев. – Москва, 2000. – 177 с.

9. Пат. 2065262 Российская Федерация, МПК6 A01F25/08, F26B3/34. Способ сушки семян зерновых культур / Бородин И.Ф., Ксенз Н.В., Гореленко А.В., Ерешко А.С., Волкова В.А. (ГНУ ВНИПТИМЭСХ). – № 93021223/13, заявл. 23.04.95; опубл. 20.08.96, Бюл. – 1996. – №23.

10. Рудобашта, С.П. Кинетика низкотемпературной сушки зерна озонированным воздухом / С.П. Рудобашта, Н.Н. Нуриев // 1-я международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ–2002): труды конференции: В 4 т.– Москва, 2002. –Т.4. – С. 56–59.

11. Бородин, И.Ф. Электрофизическая интенсификация сушки и обработки агросырья / И.Ф. Бородин // 1-я международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ-2002): Труды конференции: В 4 т. Т.1. – Москва, 2002. – С. 61–66.

12. Бородин, И.Ф. Использование электроозонированного воздуха в сельскохозяйственном производстве / И.Ф. Бородин, Н.В. Ксенз // Техника в сельском хозяйстве. – 1993. – №3. – С. 13–14.

13. Ксенз, Н.В. Озон в технологиях сельскохозяйственного производства / Н.В. Ксенз. – Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2008. – 176 с.

14. Глущенко, Л.Ф. Использование электроактивированного воздуха (ЭАВ) для сушки биологических объектов / Л.Ф. Глущенко, Н.А. Глущенко // Электронная обработка материалов. – 1987. – №2. – С. 73–75.

15. Глущенко, Н.А. Решение задачи транспортировки электроактивированного воздуха по каналу / Н.А. Глущенко, Л.Ф. Глущенко // Энергосберегающие сельскохозяйственные процессы и установки. – Горки: Изд-во БСХА, 1991. – С. 68–70.

16. А. с. 810199 СССР, МКИ5 А 23 В 7/05. Способ хранения пищевых продуктов растительного происхождения / А.К. Говорун, А.И. Комяк, В.И. Крот, В.П. Храповицкий, В.И. Цекунов, С.Н. Черенкевич; (Белорусский ордена Трудового Красного Знамени государственный университет им. В.И. Ленина). – №2749798 / 28 – 13; заявлено 04.04.79; опубликовано 07.03.81, Бюл. – 1981. – № 9.

17. Заявка 94029292 Российская Федерация, МПК6 C01B13/11. Озонаторная установка / Кравишвили Д.И., Кузин А.И., Орлов В.А., Пустовалов В.Е., Стукалов А.И., Титков Н.Е.; заявитель КБ химавтоматики, Воронеж. – № 94029292/26; заявл. 08.03.1994; опубл.

27.07.1996.

18. Пат. 2119446 Российская Федерация, МПК6 C01B13/11. Устройство для получения озона / Аболенцев В.А., Коробцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л.; заявитель и патентообладатель Аболенцев В.А., Коробцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л. – № 96120575/25, заявл. 10.10.1996; опубл. 27.09.1998.

19. Пат. 2132815 Российская Федерация, МПК6 C01B13/10, C01B13/11, A61L9/015. Озонатор / Пацевич В.В., Лопатин В.В., Кухта В.Р., Сипайлов А.Г.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 97117987/25; заявл. 22.10.1997; опубл. 10.07.1999.

20. Пат. 2211800 Российская Федерация, МПК7 C01B13/11. Способ генерирования озона и устройства для его осуществления / Бойко Н.И.; заявитель и патентообладатель Бойко Н.И. – № 2001132154/12; заявл. 29.11.01; опубл. 10.09.03.

21. Заявка 94015380 Российская Федерация, МПК6 C01B13/11. Озонатор / Худяков Л.А., Шварцман А.М., Старостин В.Н.; заявитель и патентообладатель Худяков Л.А., Шварцман А.М., Старостин В.Н. – № 94015380/26; заявл. 26.04.1994; опубл. 27.04.1996.

22. Пат. 2282109 Российская Федерация, МПК F24F3/16. Способ озонирования воздуха жилого помещения и устройство для его осуществления / Фатыхов Р.А.; заявитель и патентообладатель Фатыхов Р.А. – № 2005108686/06; заявл. 28.03.05; опубл. 20.08.06.

23. Пат. 2394756 Российская Федерация, МПК7 C01B13/11. Озонатор / Пахомов В.И., Максименко В.А., Пахомов А.И., Буханцов К.Н.; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИПТИМЭСХ. – № 2008149662/15; заявл. 16.12.08; опубл. 20.07.2010.

24. Солодова, Е.А. Влияние аэроионной обработки на микроорганизмы, пищевую и биологическую ценность продукции из морских гидробионтов: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.18.07 / Е.А. Солодова. – Владивосток, 2002. – 23

25. Тихенький, В.И. Методы и средства повышения эффективности процесса сушки семян при электроразрядном воздействии на поток воздуха: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.20.01 / В.И. Тихенький. – Санкт Петербург-Пушкин: НПО «Нечерноземагромаш», 1993. – 16 с.

26. Анискин, В.И. Технологические приемы и техническое обеспечение сушки семян и зерна в России / В.И. Анискин, А.Г. Чижиков // 1-я международная научно-практическая конфереция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ-2002): труды конференции: В 4 т. – Москва, 2002. – Т.4. – С. 7–12.

27. А. с. 1308255 СССР, МКИ4 A 01 F 25/08, F 26 B 3/34. Способ удаления свободной влаги из семян / Э.А. Каменир, И.М. Печенкин, Е.В. Володин; (Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства). – №3956392 / 30 – 15; заявлено 26.06.85; опубликовано 07.05.87, Бюл. – 1987. – № 17.

28. А. с. 1016643 СССР, МКИ5 F 26 B 3/34. Способ сушки материалов / В.В. Илюхин, Б.Е. Носков, Б.С. Бабакин; (Московский технологический институт мясной и молочной

промышленности). – №3352518 / 24 – 06; заявлено 27.10.81; опубликовано 07.05.83, Бюл. – 1983. – № 17.

29. Горский, И.В. Обработка семян пшеницы озонированным воздухом: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.20.02 / И.В. Горский. – Москва, 2004. – 20 с.

30. Грачева, Н.Н. Математическое описание энергосберегающей сушки зерна электроактивированным воздухом / А.Н. Васильев, Н.Н. Грачева // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 7-й Международной научно-технической конференции (г. Москва, ГНУ ВИЭСХ, 18 – 19 мая 2010 года). – Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – Ч.5. – С. 244–250.

Цитирование: Таранов М.А., Казакова А.С., Егорова И.В., Грачева Н.Н., Руденко Н.Б. Теоретические предпосылки способов сушки зерна электроактивированным воздухом [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2026. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2026/3/st_348.pdf
DOI: https://doi.org/10.51419/202163348.