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

УДК 631.365.22

# Анализ способов интенсификации сушки зерна как основы для разработки метода воздействия электроактивированным воздухом

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

***Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ***

## Аннотация

*В статье рассмотрен анализ способов интенсификации сушки зерна как основы для разработки метода воздействия электроактивированным воздухом. Зерновые культуры являются главным источником питания и стратегическим рыночным продуктом. Основным видом зерновой культуры на мировом рынке является пшеница. Основной причиной порчи собранного урожая являются повышенная влажность. Для интенсификации процесса сушки зерна, снижения энергоемкости и повышения качества высушиваемого материала необходимо использовать низкоуровневое циклическое воздействие. Рассмотренные электрофизические способы сушки зерна способствуют интенсификации процессов тепломассопереноса, в основном обеспечивают сохранение качества высушиваемого материала, а также снижение энергозатрат. Наибольший эффект достигается при циклических методах воздействия на зерновой слой и в случаях применения электротехнологий.*

**Ключевые слова:** ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ, ПШЕНИЦА, УРОЖАЙ, ВЛАЖНОСТЬ, СУШКА ЗЕРНА, ДОЗРЕВАНИЕ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

---

Зерновые культуры являются главным источником питания и стратегическим рыночным продуктом. Основным видом зерновой культуры на мировом рынке является пшеница. Россия входит в пятерку стран – ведущих производителей зерна – и занимает четвертое место по экспорту пшеницы. Ежегодно в России подвергается сушке 35–40 млн тонн зерна, в зависимости от погодных условий это составляет около 40–60% валового сбора зерновых [1].

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

Основными причинами порчи собранного урожая являются повышенная влажность, насекомые и плесени. Повышение влажности приводит к появлению определенного количества свободной воды, характеризующейся невысокой энергией ее связи с тканями зерна. Она может принимать активное участие в протекающих в зерне физико-химических ферментативных процессах. Увеличение влажности активизирует ферментные системы и усиливает обмен веществ. Сырое зерно с влажностью выше 17% быстро плесневеет, склонно к самосогреванию.

Сушка зерна способствует снижению влажности зерна, его дозреванию. Наряду со снижением влажности, сушка обеспечивает обеззараживание зерновой массы от плесневелых грибков и насекомых, в результате увеличивается срок хранения зерна, его качество [2, 3, 4, 5]. Сушка является важной частью в технологическом процессе производства зерновых культур. Она не только повышает стойкость зерна при хранении, но и существенно улучшает его продовольственные и семенные достоинства. Сушка обеспечивает сохранность зерна и оказывает положительное влияние на количество и качество продукции при переработке зерна и объем будущих урожаев. Таким образом, сушка позволяет привести зерно в стойкое для хранения состояние и улучшить его качество.

Для получения зерна кондиционной влажности и снижения энергозатрат в сельскохозяйственном производстве используют следующие приемы интенсификации сушки зерна: рециркуляционная сушка, предварительный нагрев, вакуумная сушка, сушка с применением инфракрасного излучения, сушка токами высокой частоты, сушка зерна под воздействием электрического поля и многие другие. В последнее время все чаще используются методы воздействия на высушиваемый материал электроактивированным воздухом.

В сельскохозяйственном производстве используют естественную и искусственную сушку зерна [6, 7]. При естественной сушке используется тепловая энергия солнца и влагопоглощающая способность наружного воздуха. Достоинства такого способа сушки – семена сохраняют свои продуктивные качества, просушиваются постепенно и полностью, не пересыхают, погибают или значительно ослабляются плесень и микроорганизмы. К недостаткам следует отнести зависимость от погодных условий, большие трудозатраты, низкую скорость сушки, не поддается механизации.

Искусственная сушка зерновых материалов не зависит от погоды и позволяет быстро просушивать большие объемы зерна. Для её осуществления используются зерносушилки

различных конструкций, отличающиеся друг от друга по виду сушильного агента, по способу передачи тепла от агента к зерну и удалению влаги из него.

Конвективный способ сушки – самый распространенный искусственный способ сушки сельскохозяйственных материалов. Популярностью применения такой способ сушки обязан простоте инженерного воплощения: в закрытую емкость помещается высушиваемый материал и через него пропускается нагретый до определенной температуры воздух. Тепло, необходимое для нагрева материала и испарения из него влаги, передается конвекцией от движущегося газообразного теплоносителя – агента сушки (нагретый воздух или его смесь с топочными газами). Агент сушки не только передает тепло, но также поглощает и уносит испаренную из материала влагу.

Существует три основных способа конвективной сушки зерна: высокотемпературная сушка, низкотемпературная сушка и сушка активным вентилированием.

Самый распространенный способ конвективной сушки – высокотемпературная конвективная сушка. Увеличение скорости сушки происходит за счет высокой температуры агента сушки – 60–350 ℃. Разброс температур агента сушки связан с конструктивными параметрами сушильной техники и, как следствие, различным состоянием зернового слоя [8, 9]. Чем больше температура агента сушки, тем выше его скорость или скорость перемещения зерна в рабочей камере. При отсутствии перемещения возникает необходимость перемешивания зерна. В качестве агента сушки чаще всего используется не нагретый воздух, а его смесь с топочными газами. Высокая температура способствует быстрому нагреву зерновки, превращению его внутренней влаги в пар и выделению пара на поверхность зернового материала.

Недостатки этого способа: неравномерный нагрев зерна – перегрев слоев, находящихся ближе к входу агента сушки в зерновой слой, что приводит к растрескиванию материала и потере им продовольственных и посевных качеств; неравномерное высушивание зерна – пересушивание слоев зерна, находящихся ближе к входу агента сушки в зерновой слой и недосушенность удаленных от места ввода теплоносителя слоев зерна; запаривание высоковлажного зерна; ограничение разового влагосъёма – до 6% за один проход; при сушке высоковлажного зерна возникает необходимость неоднократного пропуска зернового слоя через сушильную камеру; значительные расходы энергии на удаление 1 кг влаги – более 5–11 МДж/кг испаренной влаги (при норме до 5 МДж/кг).

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

Одним из развивающихся направлений создания энергосберегающих технологий сушки является низкотемпературная конвективная сушка зерна и семян. Принцип сушки тот же, что и при высокотемпературной сушке. Отличие – в невысокой температуре агента сушки – до 50 ℃ [8, 10, 11]. Данный способ сушки зерна применяется для просушивания высоковлажного зерна (более 22%) до влажности, безопасной для просушивания зерна в установках активного вентилирования. Недостатки данного способа сушки: неравномерность снижения влажности и нагрева зерна, что приводит к потере его продовольственных и посевных качеств, значительный расход энергии на удаление 1 кг влаги – до 3,5 Мдж/кг испаренной влаги.

Активное вентилирование имеет ряд преимуществ, по сравнению с высокотемпературной и низкотемпературной сушкой зерна. Первое преимущество – отпадает необходимость нагревать агент сушки до высокой температуры. При активном вентилировании воздух подогревают на 1–7 ℃ только при влажности воздуха более 65%. Это снижает затраты на подготовку агента сушки и, как следствие, энергоемкость процесса. Невысокая температура теплоносителя не приводит к пересушиванию зерна, к потере продовольственных и посевных качеств. На удаление 1 кг влаги из высушиваемого материала требуется всего 1,5–2,5 МДж/кг удаленной влаги. Активное вентилирование, в отличие от высокотемпературной и низкотемпературной конвективной сушки, используется для снижения влажности, временного хранения и консервации зерна.

Все перечисленные конвективные способы сушки в основном интенсифицируют только внешний тепломассоперенос. На удаление внутренней прочно связанной влаги данными способами сушки требуются большие затраты энергии и времени.

Для интенсификации конвективных способов сушки зерна применяют следующие методы:

- рециркуляционная сушка;
- перемешивание материала;
- чередование циклов «нагрев»–«охлаждение» зерна;
- двухстадийная сушка;
- предварительный нагрев зерна;
- комбинирование разных способов сушки;
- применение электрофизических воздействий.

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

Ни один из перечисленных способов не использует собственные системы регуляции биологических объектов для создания оптимальных условий их жизнедеятельности. Необходимо рассмотреть сушку зерна как процесс взаимодействия биологического объекта с изменяющимися технологическими воздействиями.

Зерновка – живой биологический объект. Любое технологическое воздействие на биологический объект всегда вызывает ответную реакцию. Для описания поведения зерновки в процессе сушки используется принцип максимума взаимной информации [12, 13]. Мерой адаптации системы к окружающей среде является средняя взаимная информация между условиями среды X и реакциями системы Y. Если между переменными X и Y есть связь (зависимость, корреляция), то взаимную информацию можно представить как область пересечения энтропии условий среды X– $H(X)$ и энтропией реакций системы Y– $H(Y)$.

Принцип максимума взаимной информации можно записать в следующей форме:

$$I(X,Y) = H(X) - H(X/Y) = H(Y) - H(Y/X) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $I(X,Y)$ – количество информации, получаемое при взаимодействии двух объектов X и Y, взаимная информация;

$X$ – внешнее воздействие;

$Y$ – реакция биологического объекта «зерновка» на внешнее воздействие;

$H(X)$ – энтропия внешнего воздействия;

$H(Y)$ – энтропия реакции биологического объекта, зерновки;

$H(X/Y)$ – условная энтропия «воздействие-реакция»;

$H(Y/X)$ – условная энтропия «реакция-воздействие».

Для достижения результата организм должен обеспечить максимум взаимной информации между условиями среды X и реакциями Y. Организм может добиваться этого максимума путем выбора как своих реакций Y, так и в какой-то мере путем выбора стимулов X.

Необходимо учитывать, что достижение максимума информации ограничено реакцией биологического объекта «зерновка». Поэтому условие максимума информации, с учетом ограниченности ресурсов, может быть заменено на максимум полезности L [12]:

$$L = I(X,Y) - \lambda U(X,Y) = H(X) - \lambda U(X,Y) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $L$ – полезность реакции зерновки на внешнее воздействие;

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

$U(X, Y)$ – ресурсы зерновки (энергия, вещество, время и т.д.),

$U(X, Y) \leq \text{const}$.

Итак, при воздействии на зерновой слой с целью сушки, зерновка будет выбирать такую реакцию, которая обеспечит максимальное значение полезности L после реакции. В зависимости от вида внешнего воздействия, зерновка всегда будет находиться в лучшем из возможных состояний (при разных воздействиях – в разных состояниях).

Пусть на зерновой слой осуществляется низкоэнергетическое внешнее воздействие. Внешнее воздействие слабое, т.е. зерновка «удерживает» свое установившееся состояние. Даже низкоэнергетическое внешнее воздействие, но продолжающееся длительное время, приведет к исчерпанию энергии, запасенной зерновкой. Произойдет срыв регуляции. Зерновка перейдет в новое состояние, она снова будет приспосабливаться к окружающим внешним условиям. Примером низкоэнергетического воздействия является сушка активным вентилированием, где зерновой слой длительное время продувают атмосферным воздухом, подогретым на 1-7 ℃.

С целью определения направлений использования биологической реакции зерновки на внешнее воздействие, рассмотрим динамику реакции зерновки на агент сушки в координатах полезность (L) – энергия воздействия ($U_{вв} = P_{вв}\tau$) (рис. 1).

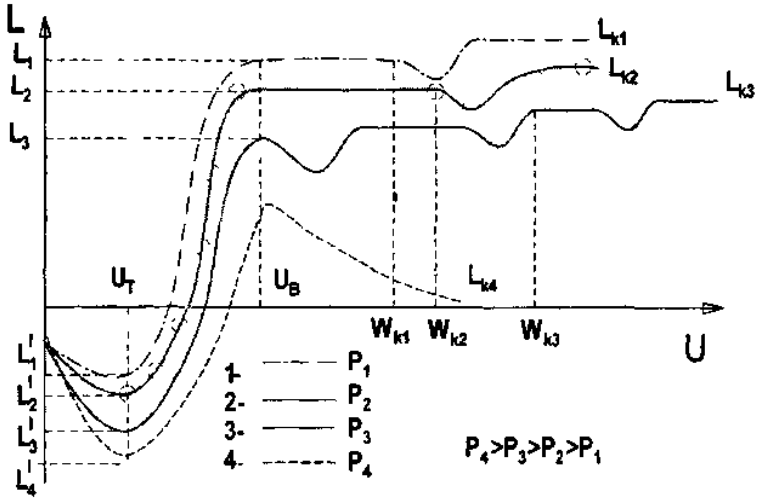



Рис. 1. Динамика реакции зерновки на внешнее воздействие в зависимости от его мощности

Отрезок $[0;\ U_T]$ – фаза превентивного торможения. С момента действия внешнего воздействия зерновка «сопротивляется» изменяющимся условиям. При нагревании

поверхности зерновки, она стремится выровнять температуру – подтягивает влагу из внутренних слоев к поверхности. Полезность реакции биологического объекта уменьшается. Причем, чем мощнее воздействие, тем меньше полезность. Когда запасенная энергия зерновки иссякнет (точка $U_T$), произойдет срыв регуляции, и зерновка перейдет в новое устойчивое состояние. Зерновка перестает «воспринимать» внешнее воздействие как вредное и начинает к нему приспосабливаться, на графике – отрезок $[U_T;\ U_в]$, называемый зоной возбуждения. Происходит прогрев зерна на глубину. Полезность реакции зерновки растет. И снова, чем мощнее воздействие, тем меньше полезность внутренней реакции зерновки, тем менее длителен процесс возбуждения.

При достижении зерновым слоем кондиционной влажности (рисунок 1, графики 1, 2, точки $W_{k1}$ и $W_{k2}$ соответственно) полезность внутренней реакции зерновки остается постоянной до следующего воздействия (в данном случае – переход от сушки к новому установившемуся состоянию).

Если внешнее воздействие по мощности превосходит ограничения, применяемые к биологическому объекту (например, температура нагрева зерна), то объект гибнет (рисунок 1, график 4).

Рассмотрим график 3 (рисунок 1). После завершения зоны возбуждения (точка $U_в$), внешнее воздействие можно изменить. Например, прекратить нагрев зерна и провести отлежку. Поверхность зерновки будет иметь температуру меньше, чем внутри. Зерновка будет стремиться выравнять температуру. Наступит снова фаза превентивного торможения, полезность внутренней реакции зерновки снизится. После выравнивания температуры полезность реакции зерновки снова станет выше. Очередная смена внешнего воздействия (нагрев зернового слоя) приведет к фазе превентивного торможения и т.д. Смена внешних воздействий, их цикличность, приведет к повышению полезности реакции зерновки. Из вышеизложенного следует:

– разная мощность внешнего воздействия приводит зерновку к разным стационарным состояниям;

– для сушки зерна эффективны те периоды внешнего воздействия, когда зерновка находится в фазе превентивного торможения (сопротивления) и использует внутреннюю энергию для процесса сушки.

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

Из принципа максимума информации следует три основных приема, использование которых в зерносушении даст эффект ресурсосбережения [12]:

– цикличность, периодичность внешнего воздействия на зерновой слой;
– полная зависимость состояния зернового слоя от внешнего воздействия;
– изменение вида внешнего воздействия в процессе сушки.

Исходя из этого, необходимо выбирать такие воздействия на биологический объект «зерновка», чтобы при минимальных энергетических затратах получить максимум полезности реакции «зерновки».

Таким образом, для интенсификации процесса сушки зерна, снижения энергоемкости и повышения качества высушиваемого материала необходимо использовать низкоуровневое циклическое воздействие.

Рассмотрим способы интенсификации сушки зерна активным вентилированием (низкоуровневое воздействие) и возможность применения циклического воздействия электрофизическими факторами (ЭАВ).

Интенсивность процесса сушки зависит от скорости перемещения влаги внутри материала и скорости ее удаления с поверхности материала [8]. Для интенсификации процесса сушки необходимо уменьшить разность между парциальным давлением пара на поверхности материала и парциальным давлением пара в окружающей среде и увеличить скорость перемещения влаги из внутренних слоев материала к поверхности. В связи с этим возможны следующие пути интенсификации процесса сушки зерна активным вентилированием:

а) снижение влагосодержания воздуха с использованием сорбентов;

б) снижение влагосодержания воздуха охлаждением до точки росы [14];

в) увеличение скорости теплоносителя (агента сушки) [8];

г) импульсная подача теплоносителя (агента сушки) [15];

д) увеличение поверхности контакта с теплоносителем [16];

е) изменение направления подачи агента сушки в слой зерна [17];

ж) повышение равномерности подвода агента сушки по толщине зернового слоя [17];

з) использование биологического возбуждения зерна [14];

и) применение электрофизических воздействий [18].

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

Для снижения влагосодержания сушильного агента применяют различные способы: осушение агента сушки с помощью сорбентов, охлаждение воздуха до точки росы [18]. Способ осушения воздуха силикагелем был предложен Г. Роймшюсселем (Дрезденский технический университет, ГДР). В установку с зерновым материалом помещают силикагельный фильтр, через который пропускается нагретый агент сушки. При этом силикагель поглощает около 40–50% влаги сушильного агента. Названный способ сушки применяется для обезвоживания зерна влажностью до 20–22%, отличается невысокой интенсивностью процесса влагосъема и требует периодического восстановления влагопоглощающих свойств сорбента.

Увеличение скорости агента сушки в установках активного вентилирования ограничено высоким сопротивлением слоя зерна и зависит от его толщины и начальной влажности. Чем толще зерновой слой, тем выше должен быть расход теплоносителя, а по сути его скорость. Изменение скорости агента сушки в 2 раза ведет к увеличению мощности вентилятора в 4 раза. Это приводит к дополнительным энергозатратам [8]. Кроме того, слои зерна, удаленные от места ввода агента сушки в зерновой слой, не достигнут кондиционной влажности и потеряют свои продовольственные, кормовые и семенные свойства.

Существует способ сушки зерна активным вентилированием с применением импульсного режима подачи теплоносителя [15]. Суть способа заключается в том, что подача подогретого воздуха и отлежка зерна чередуются с равными временными интервалами – 16 минут. Это способствует снижению энергозатрат на сушку зерна. Такой метод требует автоматизации подачи теплоносителя, снижает надежность работы вентиляционного оборудования.

Известен способ сушки зерна в бункере активного вентилирования [16], в котором достигается равномерность распределения теплоносителя по всей толщине зернового слоя, т.е. повышение эффективности процесса активного вентилирования и сушки зерна. Бункер активного вентилирования состоит из перфорированного цилиндра, воздухораспределительной трубы, электроподогревателя и вентилятора. Внутри перфорированного цилиндра расположен вращающийся полый барабан с металлическими стержнями круглого сечения, размещенными по периметру полого барабана в четыре ряда, притом полый барабан снабжен собственным механизмом привода, содержащим электродвигатель и редуктор. Такая конструкция цилиндра обеспечивает перемешивание зерна в бункере и равномерное

просушивание зерновой массы. К недостаткам реализации данного способа сушки следует отнести усложнение конструкции за счет добавления перемешивающего устройства, увеличение сопротивления на перемешивание толстого стационарного слоя зерна и необходимость мощного электропривода. Данный способ также не решает проблему удаления внутренней прочно связанной влаги.

В способе сушки [17] для равномерного просушивания зерновой массы бункер активного вентилирования снабжен воздухораспределительной системой, выполненной в виде спирали из последовательно соединенных перфорированных воздухораспределительных патрубков, размещенных по высоте перфорированного цилиндра и образующих три зоны сушки, притом каждый воздухораспределительный патрубок снабжен собственным приводным механизмом для изменения напора теплоносителя, отводимого через отверстия в воздухораспределительных патрубках. Равномерность просушивания материала достигается путем разбивки камеры сушки на 3 зоны, в каждой из которых воздухораспределительные патрубки, в виде спирали, поворачиваются под определенным углом и изменяют напор теплоносителя. Это способствует равномерному просушиванию материала в каждой зоне. К недостаткам установки для реализации данного способа сушки следует отнести увеличение металлоемкости конструкции существующей установки активного вентилирования, усложнение конструкции за счет добавления дополнительного спирального воздуховода, дополнительных разделительных секций в камеру сушки и дополнительного вентилятора, необходимость разработки нового режима сушки. Данный способ также не решает проблему удаления внутренней прочно связанной влаги.

В способе [19] в вентилируемом бункере, содержащем центральный воздуховод и корпус с выполненными в них вентиляционными отверстиями, бункер снабжен сплошной оболочкой, установленной с зазором снаружи корпуса, и заслонками, смонтированными в центральном воздуховоде, а также между корпусом и оболочкой. Заслонки, смонтированные в центральном воздуховоде, смещены в вертикальной плоскости относительно заслонок, смонтированных между корпусом и оболочкой. Регулировкой открытых и закрытых заслонок достигается изменение направления течения агента сушки сквозь зерновой слой. Таким образом, достигается полное использование потенциала тепла воздуха, равномерное просушивание зернового слоя, повышение экономичности сушилки. К недостаткам реализации данного способа сушки следует отнести необходимость внесения изменений в

конструкцию существующей установки активного вентилирования, необходимость разработки нового режима сушки. Данный способ не решает проблему удаления внутренней прочно связанной влаги.

Способ сушки и хранения зерна заключается в загрузке зерна в несколько ярусов и активном вентилировании зерна. На первом этапе на нижний ярус загружают часть зерна и подсушивают до восстановления его упругих свойств. Затем слоями загружают нижний ярус и отделенные друг от друга воздушными промежутками остальные ярусы. Устройство для сушки и хранения зерна включает секционированный по ярусам корпус, загрузочный и разгрузочный транспортеры и средства вентиляции. Корпус имеет коническую секцию, образованную обращенными к разгрузочному транспортеру пластинами с центральным углом, исключающим образование уплотненных зон и очагов слеживания зерна на пластинах. Изобретение обеспечивает сушку зерна повышенной влажности при снижении энергозатрат при сушке и хранении. К недостаткам способа сушки следует отнести сложность конструкции и режимов реализации способа. Не до конца решена проблема интенсификации удаления внутренней прочно связанной влаги.

Существует способ сушки зерновых культур с использованием режима физиологического возбуждения зерна [14]. В этом способе сушка зерновых культур осуществляется естественным холодом в зимний период с использованием автоматической системы возбужденного состояния зерна путем периодического чередования режимов физиологической активации и физиологического угнетения. Недостатками данного метода снижения влажности зерна являются: привязка к сезону года (осень–зима), низкая интенсивность, невозможность сушки высоковлажного зерна, сложность аппаратурного определения биологической реакции зерна на воздействие.

Из описанных способов интенсификации сушки зерна активным вентилированием видно, что в основном все они решают проблему интенсификации внутреннего тепломассопереноса, но за счет усложнения конструкций сушильных установок или технологических схем реализации способов. Эти проблемы могут быть решены применением электротехнологий в процессе сушки зерна активным вентилированием.

Сушка семян токами сверхвысокой и высокой частоты использует явление диэлектрического нагрева материала в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). При попадании зерна (семян) в ЭМП СВЧ молекулы воды совершают колебательные

движения, в результате которых происходит трение о соседние молекулы воды и каркаса сухого вещества. Это становится причиной нагрева воды в зерне и самого зернового материала. При этом происходит нагрев и испарение воды внутри зерна, возникает градиент давления водяных паров $\nabla p$, который выталкивает влагу на поверхность зерна. В результате чего существенно интенсифицируется процесс сушки [18]. В отличие от традиционных способов сушки, при СВЧ-нагреве градиенты влагосодержания $\nabla U$ и температуры $\nabla T$ нагрева зерновки совпадают, что интенсифицирует внутренний тепло-влагоперенос и существенно ускоряется сушка. Однако главным недостатком сушки зерна только ЭМП СВЧ являются существенные удельные энергозатраты на единицу испаренной влаги – более 11 МДж/кг исп. влаги.

Комбинированная сушка семян с применением ЭМП СВЧ включает диэлектрический нагрев и выполняется циклически в сочетании с высокотемпературным конвективным нагревом зерна до 50 ℃, а потом только кратковременная его СВЧ-обработка с повышением температуры материала до 60 ℃. При СВЧ-обработке внутри нагретой зерновки создается избыточное давление влаги при температуре ниже температуры кипения воды. Вследствие этого ускоряется фильтрационный перенос влаги из зерновки на её поверхность в капельно-жидкостном состоянии. С поверхности зерна влага удаляется подогретым воздушным теплоносителем. Удельный расход энергии на сушку зерна, по сравнению с традиционной конвективной, сокращается в 1,3 и более раз, снижаются микроповреждения семян до 6%, их посевные качества повышаются на 5%. К недостаткам можно отнести высокую стоимость СВЧ-энергии, сложность и низкую надежность источников для получения ЭМП СВЧ, проблемность стыковки конвективных сушилок с СВЧ-установкой, ограниченность по производительности.

Известен комбинированный способ сушки зерна, сочетающий в себе обработку материала в ЭМП СВЧ и активное вентилирование [18]. Способ отчасти решает проблему снижения удельных энергозатрат на сушку зерна, но имеет ряд недостатков. Сушка активным вентилированием (после СВЧ-обработки) осуществляется в стационарном слое, что подразумевает низкую производительность данного способа. СВЧ-установка работает в непрерывном режиме, но имеет малую пропускную способность. Пока зерно с выделенной поверхностной влагой (после СВЧ-обработки) заполнит рабочую емкость установки активного вентилирования, часть выделенной влаги впитается в зерно. Поэтому доля

израсходованной энергии на микроволновую обработку, оказывается затраченной впустую, что повышает удельные энергозатраты. Кроме того, недостатком является высокая стоимость СВЧ-энергии, сложность и низкая надежность источников ЭМП СВЧ.

Сушка зерна с использованием инфракрасного излучения характеризуется плотностью теплового потока на поверхности зерновки в 30–70 раз выше, чем при конвективной сушке. Но свойства зерна не допускают такого интенсивного нагрева. К тому же зерно в целом непроницаемо для ИК-излучения. Низкая проникающая способность ИК-лучей приводит к недопустимо высокому нагреву зерна, к неравномерности нагрева по толщине зерновых частиц [18]. При непрерывном облучении в зерне создается значительный температурный градиент $\nabla\Theta$, тормозящий сушку. Потому необходимо или продувать зерно охлажденным воздухом, или применять комбинированные с использованием ИК-излучения способы сушки. Механизм влагопереноса состоит в следующем: в начале сушки градиент температуры $\nabla\Theta$ значительно превосходит градиент влагосодержания $\nabla U$, что способствует перемещению влаги внутрь зерновки; за счет этого процесса увеличивается $\nabla U$ и разность влагосодержания приводит к выталкиванию влаги на поверхность зерновки. Разработан режим импульсной ИК-сушки семенного зерна, при котором длительность сушки сокращается в 2–3 раза, по сравнению с конвективной. Недостатками ИК-сушки является низкая надежность источников инфракрасного излучения, малая производительность установок, высокая энергоемкость и снижение качества материала.

Известен способ электроосмотической сушки [10,], при котором на слой высушиваемого зерна накладывают внешнее постоянное электрическое поле и при этом продувают атмосферным воздухом. Способ реализуется в бункерах активного вентилирования. К недостаткам следует отнести низкую интенсивность влагосъёма, повышенную электрическую опасность для персонала, обслуживающего установку.

В ВИМе и МГАУ под руководством академика РАСХН И.Ф. Бородина проведена экспериментальная работа по изучению электрофизической интенсификации и снижению энергоемкости процесса сушки зерна. В результате эксперимента было установлено, что при наложении постоянного внешнего электрического поля (ВЭП) на влажную зерновую массу возникает эффект электроосмоса. Эффект состоит в том, что влага перемещается под действием ВЭП. Положительные ионы, существующие вблизи мицелл крахмала зерна, за счет сил молекулярного сцепления, трения и кулоновских сил, захватывают дипольные

структуры влаги, которые выносятся на поверхность зерновок, а затем удаляются при продувке зернового слоя. При комбинированном способе сушки ВЭП, напряженностью 50 и 100 В/см, и активным вентилированием сокращается продолжительность сушки соответственно в 1,1 и 1,2 раза. При применении знакопеременного ВЭП эффективность сушки в 1,2 раза выше, чем при постоянном ВЭП. Интенсивность электроосмотического влагопереноса в зерновой массе прямо пропорциональна напряженности ВЭП, начальной температуре, исходной влажности зерна, температуре агента сушки [19]. Недостатком способа является сложность реализации в производственных условиях; повышенная электрическая опасность для персонала, обслуживающего установку; материал электродов попадает в слой высушиваемого зерна, что ухудшает продовольственные и кормовые качества зерна и вызывает коррозию металлических частей в конструкции установки.

Сушка зерна способствует не только снижению влажности высушиваемого материала, но и повышает стойкость зерна при хранении, обеззараживает зерно, существенно улучшает его продовольственные и семенные качества. Самым распространённым искусственным способом сушки зерновых материалов является конвективный способ. Такой метод сушки стал популярным благодаря своей инженерной простоте: в герметичную емкость помещают материал для сушки, через который пропускают нагретый воздух. Тепло, которое требуется для нагрева материала и испарения влаги, передается от движущегося нагретого газа – агента сушки. Агент сушки не только нагревает материал, но и поглощает испаренную влагу.

Существует множество способов интенсификации конвективного способа сушки зерновых материалов. Но все указанные способы сушки способствуют удалению поверхностной влаги (интенсифицируют внешний тепломассоперенос), на удаление внутренней прочно связанной влаги указанными способами требуются большие затраты энергии и времени.

Рассмотренные электрофизические способы сушки зерна способствуют интенсификации процессов тепломассопереноса, в основном обеспечивают сохранение качества высушиваемого материала, а также снижение энергозатрат. Наибольший эффект достигается при циклических методах воздействия на зерновой слой и в случаях применения электротехнологий.

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

Но ни один из перечисленных способов не использует собственные системы регуляции биологического объекта «зерновка» для создания благоприятных условий для удаления внутренней прочно связанной влаги. Увеличение скорости сушки зерна и снижение энергоёмкости процесса возможно за счет активации запасённой энергии зерновки, как биологического объекта, применением циклических режимов внешних воздействий.

**Список использованных источников:**

1. Резчиков, В.А. Развитие теории и практики зерносушения учеными СССР, России и СНГ / В.А. Резчиков // Третья международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2008»: в 2 т. – Москва: МГУПБ, 2008. – Т.1.– С. 32–40.

2. Казаков, Е.Д. Биохимия дефектного зерна и пути его использования / Е.Д. Казаков, В.Л. Кретович. – Москва: Наука, 1979. – 152 с.

3. Киреев, М.В. Послеуборочная обработка зерна в хозяйствах / М.В. Киреев, С.М. Григорьев, Ю.К. Ковальчук. – Ленинград: Колос. Ленингр. отд-ние, 1981. – 224 с.

4. Павлык, В.А. Электроразрядная обработка воздуха при сушке и хранении продукции / В.А. Павлык, В.И. Тихенький // Техника в сельском хозяйстве. – 1993. – № 1. – С. 15–17.

5. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е.М. Вобликов, В.А. Буханцов, Б.К. Маратов, А.С. Прокопец. – Ростов на Дону: МарТ, 2001. – 240 с.

6. Павловский, Г.Т. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна: учебное пособие для сельских профессиональных технических училищ / Г.Т. Павловский, С.Д. Птицын. – Москва: Высш. школа, 1968. – 222 с.

7. Технология приемки, хранения и переработки зерна / Б.Е. Мельник, В.Б. Лебедев, Г.А. Винников. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 367 с.: ил.

8. Сакун, В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В.А. Сакун. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: Колос, 1974. – 216 с., ил.

9. Пахомов, В.И. Рассмотрение возможности использования новой двухэтапной технологии высокотемпературной конвективной сушки и озоновоздушной обработки зерна на базе применяемых в производстве сушильных установок / В.И. Пахомов, В.А. Максименко, К.Н. Буханцов // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ-2011, Москва, 20–23 сентября 2011 года / Министерство образования и науки РФ; Министерство сельского хозяйства РФ; Российская академия сельскохозяйственных наук; Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов; ФГОУ ВПО «Московский государственный

агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». Том 2. – Москва: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2011. – С. 54-66.

10. А. с. 1308255 СССР, МКИ4 А 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.

11. 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.

12. Васильев, А.Н. Информационный подход к описанию поведения зернового слоя при сушке / А.Н. Васильев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. Агроинженерия. – 2008. – №3. – Ч.1. – С. 28–31.

13. Голицын, Г.А. Информация и биологические принципы оптимальности: Гармония и алгебра живого / Г.А. Голицын, В.М. Петров. – Изд. 2-е, стер. – Москва: КомКнига, 2005. – 128 с.

14. Фомичев, М.М. Биоэкологизированные технологии подработки, сушки, хранения и переработки зерна / М.М. Фомичев, В.И. Загинайлов // Сборник научных трудов МГАУ им. В.П. Горячкина. – Москва, 1994. – С. 15–22.

15. Казимиров, А.Н. Обоснование параметров импульсного режима сушки зерна активным вентилированием: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.20.01 / А.Н. Казимиров. – Челябинск, 2003. – 20 с.

16. Пат. 2365839 Российская Федерация, МПК F26B15/04. Бункер активного вентилирования / Н.В. Демский, С.К. Манасян, О.В. Пиляева, (ФГОУ ВПО Красноярский Государственный Аграрный Университет). – № 2008105092/06, заявл. 11.02.08; опубл. 27.01.09, Бюл. – 2009. – №24.

17. Пат. 2355963 Российская Федерация, МПК F26B17/12. Бункер активного вентилирования / Н.В. Цугленок, О.В. Пиляева, Н.В. Демский, С.К. Манасян, (ФГОУ ВПО Красноярский Государственный Аграрный Университет). – № 2008101301/06, заявл. 09.01.08; опубл. 20.05.09, Бюл. – 2009. – №14.

18. Руденко, Н.Б. СВЧ – рециркуляционная сушка зерна активным вентилированием / А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: сборник научных трудов по материалам 74-ой научно-практической конференции СТГАУ / Ставрополь: ФГОУ ВПО СтГАУ, 2010. – С. 285–290.

19. Пат. 2096943 Российская Федерация, МПК6 A01F12/60, B02B5/00. Вентилируемый бункер / В.Е. Ложкин, М.М. Черных. – № 95113133/13, заявл. 31.07.95; опубл. 27.11.97.

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

**Цитирование:** Таранов М.А., Грачева Н.Н., Руденко Н.Б., Егорова И.В., Казакова А.С. Анализ способов интенсификации сушки зерна как основы для разработки метода воздействия электроактивированным воздухом [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2026. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2026/2/st_220.pdf DOI: https://doi.org/10.51419/202162220.