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

УДК 631.365.22

Анализ динамики изменения температуры нагрева и охлаждения зерна при СВЧ рециркуляционной сушке зерна

Ксёнз Н.В., Казакова А.С., Руденко Н.Б., Грачева Н.Н., Псюкало С.П.

Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ

Аннотация

В статье рассмотрен анализ динамики изменения температуры нагрева и охлаждения зерна при СВЧ рециркуляционной сушке зерна. Проведённые исследования позволили разработать такой режим применения СВЧ рециркуляции в установках активного вентилирования бункерного типа, при использовании которого произошло увеличение производительности процесса сушки зерна по сравнению со стандартной технологией до 30% и снижение энергоёмкости процесса на 17%.

Ключевые слова: АКТИВНОЕ ВЕНТИЛИРОВАНИЕ ЗЕРНА, СВЧ-РЕЦИРКУЛЯЦИЯ, СУШКА ЗЕРНА, ТЕМПЕРАТУРА, ВЛАЖНОСТЬ, МЕЖЗЕРНОВОЕ ПРОСТРАНСТВО, УРОЖАЙ

Уборка урожая в южных регионах России традиционно проводится в условиях, характеризующихся благоприятными метеорологическими условиями. Влажность зерна в данный период достигает среднего уровня сухости, что позволяет производителям существенно снизить затраты на последующую сушку. Однако, несмотря на эти преимущества, интенсивное осыпание сухого зерна из колоса приводит к значительным экономическим потерям. Вследствие чего возрастает интерес к технологиям, направленным на раннюю уборку, при которой зерно собирается при влажности 18–22%. В таких условиях особое значение приобретают системы активного вентилирования, которые играют ключевую роль в обеспечении качества и сохранности урожая. Однако низкая производительность данных установок и неравномерность процесса высыхания зернового слоя значительно

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

ограничивают их эффективность, что требует дальнейшего совершенствования технологий и методов управления процессом уборки.

Увеличение производительности сушки зерна активным вентилированием, снижение неравномерности высыхания зерна по толщине слоя, возможно за счет применения технологии рециркуляции зерна с воздействием поля СВЧ. Использование СВЧ поля при рециркуляции зерна создаёт условия для интенсивного протекания процесса, для увеличения скорости перераспределения влаги между зерновками. Так же при СВЧ воздействии внутри зерновки создается давление паров жидкости, что способствует боле интенсивному ее выведению на поверхность зерновки и в межзерновое пространство. Следовательно, интенсивность тепло- и влагообмена значительно возрастает.

В процессе проведения эксперимента по исследованию влияния СВЧ рециркуляционной сушки зерна на высушиваемый материал наблюдали за изменениями температуры «сухого» и «влажного» зерна. Температуру в центре, на поверхности зерновок и в межзерновом пространстве контролировали с помощью хромель-копелевых термопар, подключённых к персональному компьютеру [1, 2]. Термопары показывали температуру (в соответствии со своими номерами): 1, 2, 3 – соответственно в центре, на поверхности «влажного» зерна и в межзерновом пространстве, 4, 5 – в центре и на поверхности «сухого» зерна.

СВЧ рециркуляционная сушка зерна состояла из трёх этапов. Первый этап: два цикла нагрев/охлаждение (рис. 1). На этом этапе значения измеряемых термопарами температур располагаются в следующем порядке (по убыванию): температура центра влажного зерна, температура поверхности влажного зерна, температура центра сухого зерна, температура межзернового пространства и только потом температура поверхности сухого зерна.

Во втором этапе (рис. 2, два цикла нагрев/охлаждение) значительно выросла температура межзернового пространства. Практически она стала равна температуре влажного зерна в центре и на поверхности. Это означает, что влага из более влажного зерна активно выделяется в межзерновое пространство. Но сухое зерно его еще активно не поглощает.

Третий этап (рис. 3, два цикла нагрев/охлаждение) характеризуется тем, что при нагреве значительно уменьшилась разница температур между влажным и сухим зерном.

В моменты охлаждения зернового слоя температура сухого зерна выше, чем мокрого. Это говорит о том, что уже произошло перераспределение влаги между влажным и сухим зерном в слое. Воздух межзернового пространства активно насыщен влагой [3].

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

При сушке меньшую скорость снижения температуры имел внутренний слой сухого зерна. Наиболее влажные слои зерна охлаждались более интенсивно, как и увлажненная поверхность «сухого» зерна.

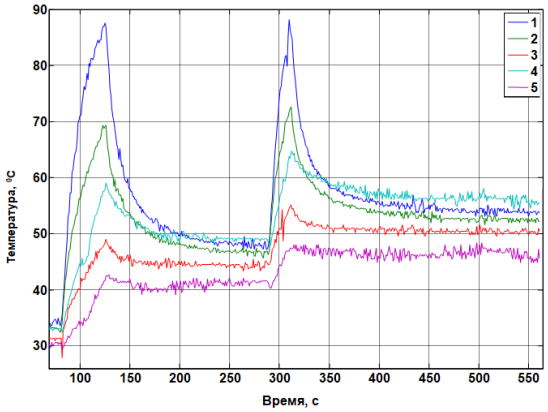


Рис. 1. Графики изменения температур на первом этапе «нагрев - охлаждение» при W_m =22%, ΔW =8%, K=0,3

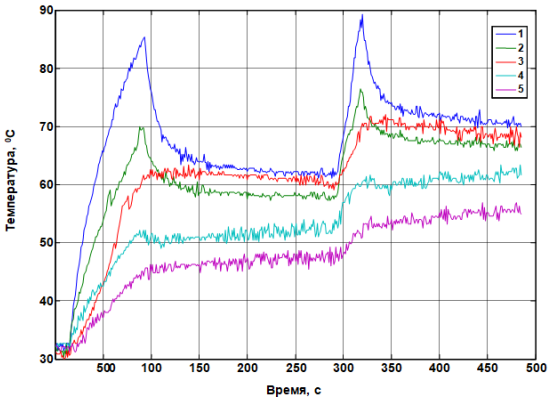


Рис. 2. Графики изменения температур на втором этапе «нагрев - охлаждение» при Wm =22%, ΔW =8%, К=0,3

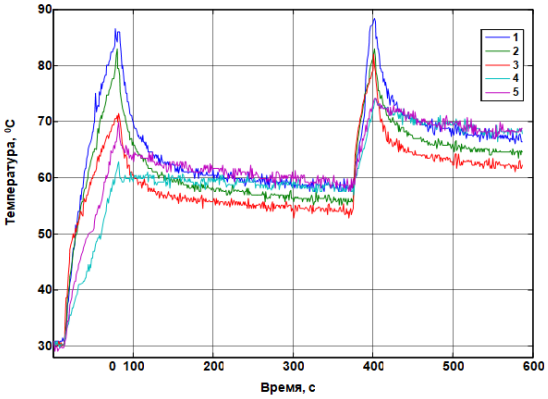


Рис. 3. Графики изменения температур на третьем этапе «нагрев - охлаждение» при Wm =22%, ΔW =8%, К=0,3

В соответствии с планом эксперимента сразу после третьего этапа СВЧ нагрева начинали процесс сушки зерна.

Полученные кривые изменения температуры зерна при СВЧ рециркуляции частично позволяют судить о ходе процесса. Однако их использование не позволяет определить, сколько циклов СВЧ рециркуляции необходимо проводить, чтобы обеспечить наибольший эффект. Затруднительно ответить и на вопрос о пропорции смешивания «влажного» и «сухого» зерна в процессе сушки (коэффициент рециркуляции K). Воспользуемся факторным анализом процесса СВЧ рециркуляционной сушки зерна для ответов на поставленные вопросы.

Факторный анализ является одним из разделов многомерного статистического анализа [4, 5]. Он основан на многомерном нормальном распределении, то есть каждый из используемых признаков изучаемого объекта должен иметь нормальный закон распределения. Факторный анализ исследует внутреннюю структуру ковариационной и корреляционной матриц системы признаков изучаемого процесса сушки.

В нашем случае необходимо определить количество факторов, которые характеризуют процесс СВЧ рециркуляции. Изначально в зону СВЧ рециркуляции помещается смесь «сухого» и «влажного» зерна. Поэтому есть все основания предположить общее состояние всего зернового слоя может описываться процессами тепло-влагообмена в «сухом» и «влажном» зерне – двумя факторами [6, 7]. Мы предполагаем, что в процессе циклической СВЧ рециркуляции влажность и температура зерновок должны выравниваться, поэтому их состояние может быть описано с помощью одного фактора – состояние зерновой смеси.

Для проведения факторного анализа использовали ранее полученные экспериментальные данные по изменению температуры зерновок и межзернового пространства при СВЧ рециркуляции. Обработку данных проводили для каждого этапа отдельно. Для обработки применяли стандартные функции MATLAB по функциональному анализу (*factoran*).

В результате обработки экспериментальных данных для первого этапа СВЧ рециркуляции зерна, при исходных данных: W_m =22%, ΔW =8%, K=0.3, получены численные значения аргумента *Loadings1*, позволяющие определить, насколько состояние зернового слоя может быт описано двумя факторами:

Loadings1 =

-0.1449	**1.0834**
0.2873	**0.7902**
0.9491	**0.0705**
0.8964	**0.1437**
1.0867	**-0.1555**

В столбцах аргумента *Loadings1* приведены весовые коэффициенты соответствия каждого параметра фактору. Так в первом столбце наибольшие веса имеют 3, 4 и 5-й параметры. Это температура в межзерновом пространстве возле «влажного» зерна (3), температура в центре (4) и на поверхности (5) «сухого» зерна. Отрицательный знак и невысокое значение первого коэффициента говорит о том, что данный параметр относится ко второму

фактору. Величина второго коэффициента говорит о том, что данный параметр (температура поверхности «влажного» зерна) занимает промежуточное положение между 1-м и вторым факторами. Это подтверждается величинами коэффициентов во втором столбце. Явно видно, что ко второму фактору относятся первый и второй параметр.

Применительно к процессам тепло-влагообмена в зерновом слое может быть использована следующая интерпретация. На первом этапе СВЧ рециркуляции зерна, для W_m =22%, ΔW =8%, K=0.3, состояние зернового слоя описывается двумя факторами: процессами, происходящими во «влажном» зерне; процессами, происходящими в «сухом» зерне. Причём, процессы в межзерновом пространстве во многом определяют процессы на поверхности «сухого» зерна, т.к. 3-й коэффициент в первом столбце выше, чем 4-й.

Иногда при выполнении функционального анализа возможно получение больших весов для нескольких параметров, что затрудняет оценку их значимости. При возникновении таких ситуаций применялось так называемое ортогональное или косоугольное вращение координат, что позволяло эффективно оценить значимость параметров.

В результате выполнения функции факторного анализа получены также величины оценок дисперсий, приведенные в аргументе *specVar1*:

specVar1 =

0.0050

0.0050

0.0092

0.0121

0.0098

Их невысокие значения говорят о том, что параметры в достаточно большой степени могут быть отнесены к своим факторам. Чем больше величина дисперсии приближается к 1, тем в меньшей степени исследуемый параметр может быть отнесён к выбранному фактору, и наоборот.

Возможности MATLAB позволяют построить на факторном пространстве векторы исследуемых параметров. Это позволяет наглядно оценить расположение векторов по отношению к факторам и интерпретировать ситуацию применительно к процессам тепло – влагообмена при СВЧ рециркуляции. Для первого этапа СВЧ рециркуляции при исходных

данных W_m =22%, ΔW =8%, K=0.3 расположение векторов параметров на факторном пространстве приведено на рис. 4.

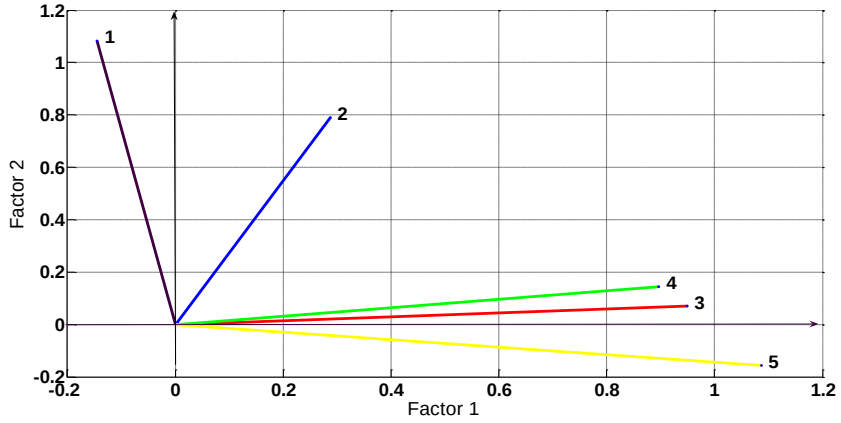


Рис. 4. Расположение векторов параметров на факторном пространстве на первом этапе СВЧ рециркуляции для W_m =22%, ΔW =8%, K=0.3

Расположение векторов наглядно демонстрирует, что зерновой слой чётко делится на две составляющие: «влажное» зерно; «сухое» зерно. Причём поверхность «влажного» зерна находится в процессе взаимодействия с поверхностью сухого зерна через межзерновое пространство.

На втором этапе СВЧ рециркуляции (рис. 5) процесс тепло-влагообмена между «влажным» и «сухим» зерном продолжается. Вектора 1 и 2 сместились вправо, уменьшив угол между векторами, относящимися к первому фактору. Следовательно, влагосодержание всей зерновой смеси выравнивается.

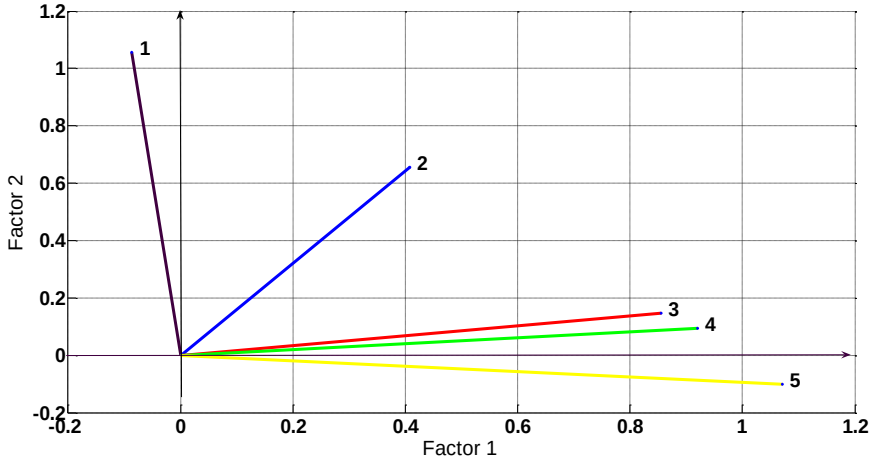


Рис. 5. Расположение векторов параметров на факторном пространстве на втором этапе СВЧ рециркуляции для W_m =22%, ΔW =8%, K=0.3

Положение векторов подтверждается и величинами коэффициентов в аргументе:

Loadings1 =

-0.0865 1.0563

0.4075 0.6555

0.8552 0.1467

0.9198 0.0945

1.0705 -0.1013

Продолжая факторный анализ для третьего этапа СВЧ рециркуляции, получили следующие графики на факторном пространстве (рис. 6).

Расположение векторов показывает, что поверхность «сухого» зерна сорбировала влагу из межзернового пространства. Поэтому влагосодержание центра и поверхности «сухого» зерна выровнялось. О чём говорит совпадение векторов температур центра и поверхности. У «влажного зерна» за счёт действия СВЧ поля произошло интенсивное перераспределение влаги от центра к поверхности. Об этом говорит смена позиций векторов 1 и 2. Влажность центра стала меньше и приблизилась к влажности поверхности «сухого» зерна.

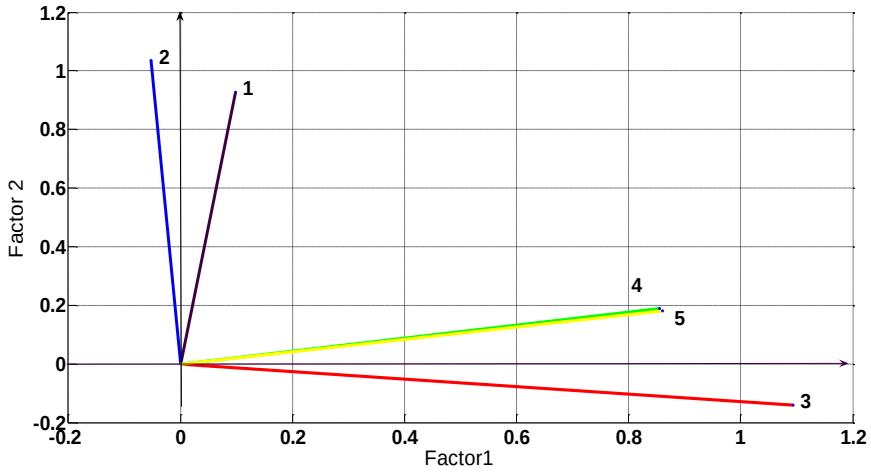


Рис. 6. Расположение векторов параметров на факторном пространстве на третьем этапе СВЧ рециркуляции для W_m =22%, ΔW =8%, K=0.3

Проведение факторного анализа экспериментальных данных СВЧ рециркуляции с последующей сушкой зерна активным вентилированием позволило сделать несколько заключений.

В большинстве исследуемых вариантов на третьем этапе СВЧ рециркуляции процесс может характеризоваться только одним фактором. Это говорит о том, что достигается достаточная однородность по влажности в смеси зернового слоя. В свою очередь это позволяет сделать вывод, что для достижения эффекта рециркуляции, при обработке смеси зерна полем СВЧ, достаточно проводить три этапа циклической обработки «нагрев – охлаждение» при перемешивании зерна в период остывания.

При высоких значениях исходных влажностей зерна (22…18%) и при низком коэффициенте рециркуляции (К=0,3) даже на третьем этапе рециркуляции процесс характеризуется двумя факторами. Это может быть показателем того, что использование зерна с такими влажностями и соотношением объёмов не эффективно при СВЧ рециркуляции.

Проведённые исследования позволили разработать такой режим применения СВЧ рециркуляции в установках активного вентилирования бункерного типа, при использовании которого произошло увеличение производительности процесса сушки зерна по сравнению со стандартной технологией до 30% и снижение энергоёмкости процесса на 17%.

Список используемых источников:

1. Васильев, А. Н. Процессы сушки зерновых материалов с использованием СВЧ-нагрева / А. Н. Васильев, Н. Б. Руденко, С. В. Маркова // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2011. – № 1(46). – С. 19-22.

2. Руденко, Н. Б. Использование поля СВЧ при рециркуляционной сушке зерна активным вентилированием: специальность 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Руденко Нелли Борисовна. – Зерноград, 2011. – 146 с.

3. Руденко, Н. Б. Математическая модель изменения температуры воздуха в межзерновом пространстве при СВЧ-рециркуляционной сушке зерна активным вентилированием / Н. Б. Руденко, Н. Н. Грачева, Д. А. Будников // Инновационные энергоресурсосберегающие технологии: Пленарные доклады и тезисы сообщений международной научно-практической конференции в рамках научной сессии (МНС-12), Москва, 08–09 ноября 2012 года / ФГБОУ ВПО Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – Москва: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкин, 2012. – С. 45-47.

4. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким,

Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка. – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

5. Лоули, Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Лоули, А. Максвелл. – Москва: Мир, 1967. – 144 с.

6. Васильев, А.Н. Динамика зернового слоя при его сушке активным вентилированием / А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко // Проблемы исследования и проектирования машин: II международная научно-техническая конференция, сборник статей. – Пенза, 2006. – С. 162-164.

7. Васильев, А.Н. Электротехнология и управление при интенсификации сушки зерна активным вентилированием / А.Н. Васильев // Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2008. – 240 с.

Цитирование: Ксёнз Н.В., Казакова А.С., Руденко Н.Б., Грачева Н.Н., Псюкало С.П. Анализ динамики изменения температуры нагрева и охлаждения зерна при СВЧ рециркуляционной сушке зерна [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2026. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2026/3/st_345.pdf DOI: https://doi.org/10.51419/202163345.