

УДК 631.563.2:51

UDC 631.563.2:51

**КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СУШКИ
ЗЕРНА АКТИВНЫМ ВЕНТИЛИРОВАНИЕМ
ЭЛЕКТРОАКТИВИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ**

**THE CRITERION EQUATION OF GRAIN
DRYING BY THE ACTIVE AERATION WITH
ELECTRO ACTIVATION AIR**

Грачева Наталья Николаевна
ассистент
*ФГБОУ ВПО «Азово-Черноморская
государственная агроинженерная академия»,
г.Зерноград, Ростовская область, Россия*

Grachyova Natalia Nikolaevna
assistant
*FSBEI HPE «The Azov-Black Sea State
Agroengineering Academy», Zernograd, Rostov
region, Russia*

Васильев Алексей Николаевич
д.т.н., профессор

Vasilyev Alexey Nikolaevich
Dr.Sci.Tech., professor

Будников Дмитрий Александрович
к.т.н.
*ГНУ Всероссийский научно-исследовательский
институт электрификации сельского хозяйства
(ВИЭСХ), г.Москва, Россия*

Budnikov Dmitry Alekcandrovich
Cand.Tech.Sci.
*SSI The All-Russian Research Institute for
Electrification of Agriculture (ARRIEA), Moscow,
Russia*

Статья посвящена выводу критериального уравнения сушки зерна активным вентилированием с использованием электроактивированного воздуха. Критериальное уравнение получено с использованием уравнений сушки толстого слоя зерна активным вентилированием и теории подобия

The article is devoted to deduction of the criteria equation for grain drying by the active aeration with the electroactivated air use. The criteria equation is deduced with the use of the grain thick layer drying equations by the active aeration and the similarity theory

Ключевые слова: СУШКА ЗЕРНА, АЭРОИОНЫ, КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ, ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ, АКТИВНОЕ ВЕНТИЛИРОВАНИЕ

Keywords: GRAIN DRYING, AEROIONS, CRITERIA EQUATION, ENERGY SERVING TECHNOLOGIES, GRAIN CROPS, ACTIVE AERATION

Сушка зерна – один из наиболее энергоемких этапов в процессе послеуборочной обработки. Цель сушки – получить зерно кондиционной влажности. Сушка не только повышает стойкость зерна при хранении, но и существенно улучшает его продовольственные и семенные достоинства, обеспечивает сохранность зерна, оказывает положительное влияние на количество и качество продукции при переработке зерна, существенно влияет на качество и объем будущих урожаев.

Классические тепловые способы сушки зерна очень энергоемки. Возможность их эффективного применения ограничена свойствами высушиваемого материала. Сушильные установки, используемые для сушки зерна, физически изношены и не отвечают современным требованиям энергосбережения, способы усовершенствования

конструкций зерносушилок исчерпаны.

Для получения зерна кондиционной влажности и снижения энергозатрат в сельскохозяйственном производстве используют методы воздействия на высушиваемый материал электроактивированным воздухом (ЭАВ). Именно такой подход экономит производителю время на сушку полученного урожая и энергию, затрачиваемую на упомянутый процесс.

В научной и патентной литературе описано большое количество способов сушки зерна с использованием ЭАВ – озона, аэроионов и озон-воздушных смесей [2]. Выявлено, что в каждой из указанных работ для сушки зерна используются разные концентрации ЭАВ. Различны и режимы сушки зерна ЭАВ. В существующих теориях интенсификации сушки зерна с использованием ЭАВ нет единства в указании механизма влияния ЭАВ на агент сушки и высушиваемый материал.

Не получены кинетические зависимости, позволяющие надежно переносить лабораторные исследования на промышленные условия, отличающиеся различным сочетанием технологических и конструктивных параметров.

Исследованию процесса сушки зерна в бункерах активного вентилирования посвятил свои работы Анискин В.И. [1]. Уравнения сушки зернового слоя представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения, решение которых затруднено тем, что зерно является гетерогенным материалом. Для описания процесса сушки зерна в толстом слое активным вентилированием Анискин В.И. разработал и проверил опытным путем критериальные уравнения сушки зерна активным вентилированием при вертикальной и радиальной подаче агента сушки:

$$Ho = A \cdot Ko^\alpha \cdot Gu^\beta \cdot Re^\gamma \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^\omega. \quad (1)$$

Критерий гомохронности Ho (2) описывает продолжительность сушки зернового слоя при постоянной скорости агента сушки. Он изменяется с течением времени при постоянной скорости агента сушки и фиксированной толщине зернового слоя.

$$Ho = \frac{v \cdot \tau}{L} \quad (2)$$

где v – скорость агента сушки, м/с;
 τ – продолжительность сушки, с;
 L – толщина зернового слоя, м.

Критерий Коссовича Ko (3) отражает соотношение между теплом, затраченным на испарение влаги и теплом, расходуемым на нагрев зерна:

$$Ko = \frac{r' \cdot \Delta w}{c_{\zeta} \cdot \Delta \Theta} \quad (3)$$

где w – влажность зерна, %;
 r' – удельная теплота парообразования, кДж/кг;
 c_{ζ} – теплоемкость зерна, кДж/(кг·°С);
 Θ – температура зерна, °С.

Критерий Гухмана Gu (4) характеризует потенциальные возможности воздуха как агента сушки. Величина критерия Gu зависит от разности между температурой агента сушки и температурой мокрого термометра. Температура мокрого термометра находится в прямой зависимости от влажности воздуха.

$$Gu = \frac{t_{\bar{n}} - t_i}{273 + t_{\bar{n}}} \quad (4)$$

где $t_{\bar{n}}$ – температура агента сушки, °С;
 t_i – температура «мокрого» термометра, °С.

Критерий Рейнолдса Re (5) отражает гидродинамический режим движения агента сушки:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (5)$$

где v – скорость агента сушки, i / \tilde{n} ;
 d – приведенный диаметр зерновки, i ;
 ν – кинематическая вязкость воздуха, i^2 / \tilde{n} .

Для описания процесса сушки зерна активным вентилярованием с применением аэроионов преобразуем уравнение В.И. Анискина. Добавим в критериальное уравнение новый критерий Q_1 , выражающий концентрацию аэроионов в объеме зерна (6):

$$Q_1 = Q \cdot V \cdot \frac{\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}}{\tau_i} \quad (6)$$

где Q – концентрация аэроионов, $1/i^3$;
 V – объем зерна, подвергающегося сушке, i^3 ;
 $\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$ – продолжительность подачи аэроионов, \div ;
 τ_i – продолжительность периода, \div .

Продолжительность периода τ_i численно равно сумме двух временных интервалов – интервала подачи аэроионов $\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$ и интервала отсутствия аэроионов $\tau_{\hat{a}\hat{u}\hat{e}\hat{e}}$ (7):

$$\tau_i = \tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} + \tau_{\hat{a}\hat{u}\hat{e}\hat{e}} \quad (7)$$

Если в процессе сушки зерна активным вентилярованием с использованием ЭАВ аэроионы включены постоянно, то множитель – отношение времени включения аэроионов и времени периода аэроионов становится равным 1 и выражение (6) остается без третьего множителя. Если же в процессе сушки аэроионы подаются периодически, т.е. промежуток времени $\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$ аэроионы подаются, а затем промежуток времени $\tau_{\hat{a}\hat{u}\hat{e}\hat{e}}$ ионы не подаются, тогда предложенный нами критерий будет выглядеть как указано в (6).

В результате, критериальное уравнение сушки зерна активным вентилированием с применением аэроионов будет выглядеть следующим образом (8):

$$Ho = A \cdot Ko^\alpha \cdot Gu^\beta \cdot Re^\gamma \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^\omega \cdot Q_i^\mu \quad (8)$$

Рассмотрим процесс изменения концентрации аэроионов при сушке зерна активным вентилированием электроактивированным воздухом (ЭАВ).

Процесс транспортировки ЭАВ по воздуховоду является определяющим для концентрации аэроионов на входе в зерновой слой. Согласно [4, 5], концентрация аэроионов на выходе из воздуховода (т.е. на входе в зерновой слой) зависит от концентрации аэроионов на входе в воздуховод, коэффициента объемной рекомбинации аэроионов, скорости ухода аэроионов на стенки воздуховода и от геометрических размеров воздуховода.

Для получения зависимости концентрации аэроионов Q в воздуховоде при сушке зерна активным вентилированием ЭАВ (от источника аэроионов до входа в зерновой слой) примем следующие обозначения:

E – напряженность электрического поля, создаваемого электроактиватором, \hat{A}/i ;

T_a – температура агента сушки, $^{\circ}C$;

V_a – скорость агента сушки, i/\tilde{n} ;

L_T – расстояние от электроактиватора до входа в зерновой слой, i ;

α – коэффициент объемной рекомбинации аэроионов, i^3/\tilde{n} ;

V_0 – скорость ухода аэроионов на стенки воздуховода, $1/\tilde{n}$;

Чтобы исследовать процесс и поставить эксперимент по установлению закона изменения концентрации аэроионов в воздуховоде,

необходимо провести многофакторный эксперимент с шестью указанными выше факторами. Количество опытов пропорционально числу факторов в степени, равной количеству уровней варьирования каждого фактора. Поставить такой эксперимент невозможно из-за огромного количества опытов.

Применим теорию подобия для моделирования изучаемого процесса и постановки эксперимента [3]. Учитывая перечисленные факторы, получим полное физическое уравнение, описывающее исследуемый процесс (9):

$$Q = f(E, T_a, V_a, L_T, \alpha, V_0) \quad (9)$$

Составим полную матрицу размерностей $\|A\|$ для исследуемых параметров. Запишем размерности всех параметров в выбранной системе основных единиц измерения (в системе СИ) – $[M], [L], [T], [I], [\Theta]$ [5]:

$$Q = [M]^0 [L]^{-3} [T]^0 [I]^0 [\Theta]^0;$$

$$E = [M]^1 [L]^1 [T]^{-3} [I]^{-1} [\Theta]^0;$$

$$T_a = [M]^0 [L]^0 [T]^0 [I]^0 [\Theta]^1;$$

$$V_a = [M]^0 [L]^1 [T]^{-1} [I]^0 [\Theta]^0;$$

$$L_T = [M]^0 [L]^1 [T]^0 [I]^0 [\Theta]^0;$$

$$\alpha = [M]^0 [L]^3 [T]^{-1} [I]^0 [\Theta]^0$$

$$V_0 = [M]^0 [L]^0 [T]^{-1} [I]^0 [\Theta]^0$$

Таким образом, получим полную матрицу размерностей $\|A\|$, в которой число строк – число параметров $m = 7$, число столбцов – число основных единиц измерения $q = 5$ (10).

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 0 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Число k независимых параметров равно рангу матрицы размерностей $\|A\|$, а число критериев подобия – $m - k$.

Согласно матричному анализу, определитель, имеющий две линейно зависимые строки (столбца), равен нулю. В нашем случае первая и пятая строки линейно зависимы, шестая и четвертая строки – линейная комбинация пятой и седьмой строк, первый и четвертый столбец – линейно зависимы. Поэтому исключим из матрицы линейно зависимые строки и столбцы. Получим сокращённую матрицу $\|A'\|$ (11):

$$\|A'\| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad (11)$$

Для данной матрицы существуют определители четвёртого порядка неравные нулю ($k = 4$). Поэтому из семи параметров можно выбрать четыре независимых и, таким образом, изучаемый процесс характеризуется тремя критериями подобия. Выберем в качестве независимых параметров: E, T_a, L_T, V_0 (согласно ненулевому определителю матрицы), в качестве критериев подобия – Q, V_a, α .

Для нахождения зависимостей критериев подобия от независимых параметров запишем уравнение (9) в следующем виде:

$$\frac{Q}{[E]^{\alpha_1} [T_a]^{\beta_1} [L_T]^{\gamma_1} [V_0]^{\tau_1}} = \Phi \left(\frac{V_a}{[E]^{\alpha_2} [T_a]^{\beta_2} [L_T]^{\gamma_2} [V_0]^{\tau_2}}; \frac{\alpha}{[E]^{\alpha_3} [T_a]^{\beta_3} [L_T]^{\gamma_3} [V_0]^{\tau_3}} \right) \quad (11)$$

Вычислим значения коэффициентов $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \tau_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \tau_2, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3, \tau_3$.

Выразим каждый критерий подобия в (11) через систему основных единиц:

$$\frac{Q}{[E]^{\alpha_1} [T_a]^{\beta_1} [L_T]^{\gamma_1} [V_o]^{\tau_1}} = \frac{[L]^{-3}}{([M]^1 [L]^1 [T]^{-3} [I]^{-1})^{\alpha_1} \cdot ([\Theta]^1)^{\beta_1} \cdot ([L]^1)^{\gamma_1} \cdot ([T]^{-1})^{\tau_1}} \quad (11)$$

Вычислим коэффициенты, стоящие в степени каждой основной единицы:

$$[M]: \alpha_1 = 0;$$

$$[L]: \alpha_1 + \gamma_1 = -3 \Rightarrow \gamma_1 = -3;$$

$$[T]: -3\alpha_1 - \tau_1 = 0 \Rightarrow \tau_1 = 0;$$

$$[I]: -\alpha_1 = 0;$$

$$[\Theta]: \beta_1 = 0.$$

Получим первый критерий подобия: $\pi_1 = Q \cdot L_o^3$.

Те же действия применим к критериям V_a, α .

$$\frac{V_a}{[E]^{\alpha_2} [T_a]^{\beta_2} [L_T]^{\gamma_2} [V_o]^{\tau_2}} = \frac{[L]^1 [T]^{-1}}{([M]^1 [L]^1 [T]^{-3} [I]^{-1})^{\alpha_2} \cdot ([\Theta]^1)^{\beta_2} \cdot ([L]^1)^{\gamma_2} \cdot ([T]^{-1})^{\tau_2}} \quad (12)$$

$$[M]: \alpha_2 = 0;$$

$$[L]: \alpha_2 + \gamma_2 = 1 \Rightarrow \gamma_2 = 1;$$

$$[T]: -3\alpha_2 - \tau_2 = -1 \Rightarrow \tau_2 = 1;$$

$$[I]: -\alpha_2 = 0;$$

$$[\Theta]: \beta_2 = 0.$$

Второй критерий подобия: $\pi_2 = \frac{V_a}{L_o \cdot V_o}$.

$$\frac{\alpha}{[E]^{\alpha_3} [T_a]^{\beta_3} [L_T]^{\gamma_3} [V_o]^{\tau_3}} = \frac{[L]^3 [T]^{-1}}{([M]^1 [L]^1 [T]^{-3} [I]^{-1})^{\alpha_3} \cdot ([\Theta]^1)^{\beta_3} \cdot ([L]^1)^{\gamma_3} \cdot ([T]^{-1})^{\tau_3}} \quad (13)$$

$$[M]: \alpha_3 = 0;$$

$$[L]: \alpha_3 + \gamma_3 = 3 \Rightarrow \gamma_3 = 3;$$

$$[T]: -3\alpha_3 - \tau_3 = -1 \Rightarrow \tau_3 = 1;$$

$$[I]: -\alpha_3 = 0;$$

$$[\Theta]: \beta_3 = 0.$$

$$\text{Третий критерий подобия: } \pi_3 = \frac{\alpha}{L_T^3 \cdot V_0}.$$

Получим: $\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3)$ или

$$Q = \frac{1}{L_T^3} \cdot \left(\frac{V_a}{L_T \cdot V_0}, \frac{\alpha}{L_T^3 \cdot V_0} \right) \quad (14)$$

Таким образом, получено критериальное уравнение, описывающее процесс сушки зерна активным вентилированием с использованием электроактивированного воздуха (ЭАВ). Согласно полученному уравнению, продолжительность процесса сушки зерна активным вентилированием с использованием ЭАВ зависит от параметров агента сушки, состояния зернового слоя и концентрации аэроионов.

Литература

1. Анискин, В.И. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием [Текст] / В.И. Анискин, В.А. Рыбарук. – М.: Колос, 1972 – 190 с.
2. Васильев, А.Н. Анализ моделей сушки зерна электроактивированным воздухом [Текст] / А.Н. Васильев, Н.Н. Грачева // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: Сб.науч. трудов по материалам научно-практической конференции электроэнергетического факультета / Отв. Ред. И.В. Атанов. – Ставрополь: ФГОУ ВПО СГАУ, 2009. – С. 31-37
3. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): Учебник для вузов по спец. «Кибернетика электр. систем» / В.А. Веников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
4. 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
5. Кононенко, А.Ф. Режимы предпосевной обработки семян электроактивированным воздухом с низкой концентрацией аэроионов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / А.Ф. Кононенко. – Зерноград, 2002. – 19 с.