



АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ЗЕРНА ОТ ВЛАЖНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ

Г.А. Бибик

к.т.н., доцент кафедры электрификации
ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА»

*Пределная температура
нагрева зерна, влажность
зерна, длительность
сушки*

*Limiting temperature
of heating of grain, humidity
of grain, duration of drying*

Сушка зерна в условиях Нечерноземной зоны РФ является обязательной операцией послеуборочной обработки вороха, поступающего от комбайнов. Время уборки ограничено сроком 8-12 дней, при суточном поступлении зерна от 6 до 12 часов. Сушка является основным средством его консервирования. С увеличением потока зерна ставится задача – повышение эффективности работы сушилок.

Основной метод ускорения сушки – повышение температуры агента сушки. При длительной сушке (6–9 часов) в неподвижном слое температуру агента сушки обычно устанавливают в пределах 35–40°C. При длительной сушке зерно можно нагревать только до предельной температуры (T_{np}), которая зависит от влажности (W) зерна и времени (τ) его сушки. Экспериментальные данные, соответствующие этой зависимости [1], приведены в таблице 1.

Управлять процессом сушки в соответствии с данными этой таблицы довольно сложно, поэтому неоднократно предпринимались попытки установления аналитической зависимости между параметрами сушки с предельной температурой нагрева зерна. За рубежом нашла применение формула Хатчинсона:

$$T_{np1} = 122 - 5,4 \lg \tau - 44 \lg W. \quad (1)$$

В нашей стране используется формула С.Д. Птицына [2]:

$$T_{np2} = \frac{2350}{0,37(100 - W) + W} + 20 - 10 \lg \tau. \quad (2)$$

Точность расчетов по этим формулам:

– для данных, полученных по формуле Хатчинсона, среднеквадратическое отклонение температуры от исходных значений $V(\Delta) = 8,33^\circ\text{C}$, а относительной ошибки $V(\delta) = 15,1\%$;

– для данных, полученных по формуле С.Д. Птицына, в диапазоне влажности $W=5...45\%$, $V(\Delta)=0,3^\circ\text{C}$, а $V(\delta)=0,78\%$. На краях диапазона (большая влажность $W=40...45\%$, длительность сушки $\tau=180$ минут) точность уменьшается.

Анализ данных показывает, что эти формулы недостаточно точно отражают табличные значения и довольно сложны для построения схем управления процессом сушки. Кроме того, в этих формулах предельная температура зависит от двух переменных (W , τ), связь

Таблица 1 – Предельная температура сушки зерна

W, %	5	10	15	20	25	30	35	40	45
τ, мин.	T_{np}								
5	71,5	67,4	63,6	60,4	57,6	55,2	52,8	50,5	48,1
10	68,5	64,4	60,6	57,4	54,6	52,2	49,7	47,9	45,7
15	66,7	62,6	58,8	55,6	52,8	50,4	48,0	45,7	43,5
30	63,6	59,6	55,8	52,6	49,8	47,4	45,0	43,7	41,5
45	62,0	57,9	54,1	50,9	48,1	45,7	43,3	41,0	38,8
60	60,7	56,6	52,8	49,6	46,8	44,4	42,0	39,7	37,5
90	59,0	54,9	51,1	47,9	45,1	42,7	40,3	38,0	35,8
180	55,5	51,4	47,6	44,4	41,6	39,2	36,8	34,5	32,3

между которыми установить довольно сложно. Поэтому данные формулы не пригодны для разработки схем управления процессом сушки зерна.

Для уточнения и упрощения рабочих формул преобразуем таблицу 1 в таблицу 2.

За начальную температуру $T_0, ^\circ\text{C}$ принята температура при длительности сушки 180 минут.

Таблица 2 содержит две, не связанные между собой зависимости:

$$T_w = T_0 = f(W); \quad \Delta T\tau = \varphi(\tau). \quad (3)$$

Функция $\Delta T\tau = \varphi(\tau)$ идентична для любой влажности в диапазоне 5...30% и несколько отличается при влажности 35,40,45%. Видимо, это результат того, что при влажности больше 30% сыпучий материал ведет себя как свободная водная поверхность. Поэтому аппроксимацию следует проводить в двух диапазонах:

$W_1 = 5...30\%$ и $W_2 = 35...45\%$. Указанные функции представлены в таблице 3.

Поскольку мы разделили функцию двух переменных на независимые функции по каждому из них, упрощаются аналитические выражения и становится возможным раздельное управление по каждому из двух независимых параметров (W, τ).

Аналитическая зависимость приращения предельной температуры нагрева зерна от длительности сушки хорошо аппроксимируется логарифмической функцией методом наименьших квадратов:

$$\Delta T\tau = 22,95 - 4,33 \ln \tau.$$

Среднеквадратические значения абсолютной и относительной ошибок равны

$V(\Delta(\Delta T\tau)) = 5,04 \cdot 10^{-2} ^\circ\text{C}$; $V(\delta) = 0,698\%$. Эта зависимость хорошо аппроксимируется и методом

Таблица 2 – Зависимость приращения предельно-допустимой температуры нагрева зерна от влажности и времени его сушки

W, %	5	10	15	20	25	30	35	40	45
τ, мин.	$\Delta T_{пр}, ^\circ\text{C}$								
5	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	15,8
10	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	13,4	13,4
15	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
30	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,2	9,2	8,9
45	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
60	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
90	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$T_0, ^\circ\text{C}$	55,5	51,4	47,6	44,4	41,6	39,2	36,8	34,5	32,3

Таблица 3 – Раздельное представление функций влажности и температуры нагрева зерна

W,%	5	10	15	20	25	30	35	40	45
T ₀ ,°C	55,5	51,4	47,6	44,4	41,6	39,2	36,8	34,5	32,3
τ, мин.	5	10	15	30	45	60	90	180	
ΔTτ,°C	16,0	13,0	11,2	8,1	6,5	5,2	3,5	0	

минимума относительной ошибки, предложенного нами [3]:

$$\Delta T\tau = \frac{19,57}{1 + 4,76 \cdot 10^{-2} \cdot \tau} \quad (4)$$

Ошибки этой формулы несколько больше, чем у предыдущей ($V(\Delta T\tau)=0,2\%$; $V(\delta)=3,55\%$), но она лучше поддается теоретическому анализу и по ней проще изготовить схему управления.

Аналитическая зависимость предельной температуры нагрева зерна от влажности реализуется формулами (T_1, T_2) в диапазонах 5...30 и 35...45%:

$$\begin{aligned} T_1 &= 60,11 - 0,9645 \cdot W + 8,929 \cdot 10^{-3} W^2; \\ V(\Delta T_1) &= 3 \cdot 10^{-2} \% ; \quad V(\delta_1) = 6,5 \cdot 10^{-2} \% ; \\ T_2 &= 52,53 - 0,45W ; \quad V(\Delta T_2) = 2,4 \cdot 10^{-2} \% ; \\ V(\delta) &= 1,98 \cdot 10^{-2} \% . \end{aligned} \quad (5)$$

После объединения формул (3) и (5) получим:

$$\begin{aligned} &\text{- для } W=5 \dots 35\% \\ T_3 &= 83,06 - 0,9645 \cdot W + 8,929 \cdot 10^{-3} W^2 - \\ &\quad - 4,33 \ln \tau ; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\text{- для } W=35 \dots 45\% \\ T_4 &= 75,48 - 0,45W - 4,33 \ln \tau . \end{aligned} \quad (7)$$

Среднеквадратические абсолютные и относительные ошибки равны:

$$V(\Delta T) = 3,1 \cdot 10^{-2} \% ; \quad V(\delta) = 6,6 \cdot 10^{-2} \% .$$

В таблице 4 приведены среднеквадратические значения ошибок аппроксимации по формулам Хатчинсона – $T_{1пр1}$, Птицына – $T_{пр2}$ и предлагаемыми T_3 и T_4 .

Согласно этой таблице, предлагаемая формула ($T_3, ^\circ\text{C}$) точнее известных, особенно в диапазоне влажности $W=5 \dots 35\%$.

Таблица 4 – Ошибки аппроксимации

W,%	T _{пр1} ,°C	T _{пр2} ,°C				T ₃ ,°C			
	5...45	5...35	40	45	5...45	5...35	40	45	5...45
V(Δ) · 10 ⁺² ,°C	833	15,2	49,5	57,0	30,0	4,32	39,8	29,8	17,0
V(δ) · 10 ⁺¹ ,%	151	3,60	11,9	15,0	7,78	0,81	2,99	7,00	2,64

Вывод

Предложена аналитическая зависимость предельной температуры нагрева зерна, которая в 3–4 раза точнее известных. Она легче анализируется и схемно реализуется.

Литература

- Захарченко, И. В. Послеуборочная обработка семян в Нечерноземной зоне [Текст]: монография / И.В. Захарченко. – М.: Россельхозиздат, 1983.–263с.
- Птицын, С.Д. Зерносушилки, технологические основы, тепловой расчет и конструкции [Текст]: монография / С.Д. Птицын. – М.: Машиностроение, 1966. – 211 с.
- Бибик, Г.А. Математическая обработка экспериментальных данных [Текст] / Г.А. Бибик // Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК. Международная научная конференция. Сборник научных трудов. Ч. 3. – Ярославль, 2003. – С. 280-282.