

DISEÑO DEL SECADO FLUIDIZADO DE ARROZ A RÉGIMEN OSCILATORIO

M. BOIZÁN, M. TORRES Y N. MARZAL

*Fac. de Tecnología Universidad de Oriente, Stgo. de Cuba.**Recibido: 7 de agosto de 1975.**Recibido: 10 de febrero de 1977.**Recibido: 15 de julio de 1977.*

ABSTRACT. As part of an investigation of the drying of rice in a fluidized bed at oscillatory regimes (alternating heating and cooling) we have developed the programs for the evaluation of the necessary parameters of the stages of the process.

RESUMEN. Como parte de una investigación general sobre el secado fluidizado de arroz a régimen oscilatorio (alternando etapas de calentamiento y de enfriamiento) se han desarrollado los programas indispensables para la evaluación de los parámetros necesarios de las etapas del proceso.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo está dedicado al estudio del diseño del proceso de secado de materiales termolábiles. Productos termolábiles son aquellos en los cuales por encima de una temperatura máxima permisible se alteran sus propiedades nutritivas o germinativas, por ejemplo, los granos alimenticios como el arroz, trigo, café, etc. La naturaleza específica, biológica de estos granos exige que se escojan cuidadosamente los métodos y regímenes de secado que aseguran la conservación del grano. Para esto, el método más moderno y más convincente es el secado fluidizado a régimen oscilatorio.

El régimen oscilatorio ofrece muchas ventajas en comparación con la técnica de secado en camas densas de muy poca movilidad de los secadores de cuba, pues el equipo fluidizado es más sencillo, la duración del ciclo de secado es más pequeña y se garantiza la durabilidad del grano en un alto grado. Por esto, el objetivo de este estudio consistió en elaborar los programas necesarios para llevar a cabo una evaluación previa a la investigación experimental del secado fluidizado a régimen oscilatorio aplicado al secado de arroz, producto de gran importancia para la economía nacional cubana. El modelo matemático utilizado en la descripción del proceso a régimen de oscilaciones simétrico es el propuesto por Guinzburg y Rezhikov,¹ Aunque, sin embargo, el procedimiento de diseño de las etapas de secado ha sido desarrollado siguiendo un método de trabajo original.

El régimen oscilatorio consiste en someter al producto a un calentamiento inicial y, posteriormente, después que la temperatura de éste alcanza un valor máximo permisible, se produce un enfriamiento y así, alternativamente, el producto se calienta y enfría hasta alcanzar la humedad deseada.

A este régimen el proceso de secado se integra de una serie de ciclos, en cada uno de los cuales el material calentado hasta la temperatura óptima del material se enfría en una zona intermedia de enfriamiento. Se aprovecha así el hecho de que en la zonas de enfriamiento intermedio no ocurre la absorción de calor por parte del material, sólo tiene lugar su enfriamiento, y se puede establecer un equilibrio dinámico entre los procesos de transferencia de masa y calor.

De esta forma, la aplicación del régimen oscilatorio favorece una rápida disminución del recalentamiento y evita que la superficie de las partículas del material se reseque durante el proceso de secado, lo cual a su vez permite aumentar apreciablemente la temperatura del agente de calentamiento, sin sobrepasar el intervalo de sensibilidad térmica del producto.

La fundamentación teórica de la aplicación del régimen oscilatorio al secado de materiales termolábiles la formuló por primera vez A. V. Luikov, del Instituto de Transferencia de Masa y Calor de la Academia de Ciencias de Bielorrusia, URSS. Liuboshie y cols.² y Liuboshic y Pikus³ además de camas fluidizadas, han estudiado esta técnica en camas densas y suspensas (flujo neumático).

Uno de los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta al organizar el proceso de secado de materiales termolábiles aplicando el método de secado analizado, es la selección del régimen de oscilaciones óptimo, que se define como el valor más ventajoso de la relación existente entre el tiempo de calentamiento del material en cada uno de las ciclos y el de enfriamiento $\Delta\tau_{\text{cal}}/\Delta\tau_{\text{enf}}$ y también la duración de los ciclos $T = \Delta\tau_{\text{cal}} + \Delta\tau_{\text{enf}}$ (o la frecuencia de las oscilaciones $\nu = 1/T$).

Es necesario destacar que el aumento de la frecuencia de las oscilaciones permite aplicar, en el proceso considerado, agentes secadores a muy altas temperaturas sin peligro de que el material de recaliente o disminuya su calidad.

Al seleccionar el régimen oscilatorio óptimo es preciso que se tomen en cuenta no sólo las características del material a secar (termolabilidad, relación entre la velocidad de calentamiento y la deshidratación, tamaño de las partículas, etc.), sino también, la solución constructiva de la instalación más sencilla y favorable. En relación con esto se recomienda como la forma más sensata y económica⁴ de realizar el

proceso de secado fluidizado de materiales dispersos, el régimen oscilatorio simétrico de altas frecuencias, cuando la duración de los períodos de calentamiento y enfriamiento del material es idéntico, es decir: $\Delta\tau_{\text{cal}} = \Delta\tau_{\text{enf}}$, o sea: $\Delta\tau_{\text{cal}}/\Delta\tau_{\text{enf}} = 1:1$.

Si el proceso oscilatorio se realizara siguiendo un esquema asimétrico: $\Delta\tau_{\text{cal}}/\Delta\tau_{\text{enf}}/1$, la construcción del secador se haría más compleja, sin contar que también se pueden empeorar los índices técnico-económicos del proceso.

Método de diseño y programación.

El procedimiento de diseño de secadores fluidizados a régimen oscilatorio se fundamenta en la determinación de la duración del proceso de secado considerando la relación mutua existente entre la velocidad de secado y los otros parámetros del proceso.

Comúnmente, al proyectar un secador se dan como datos, su productividad (G), la humedad inicial (w_1^c) y final (w_2^c) del material y su temperatura inicial. Mediante cálculo se deben fijar las dimensiones del equipo secador, el gasto de aire y de energía térmica, la caída de presión que ocasiona el equipo y la potencia requerida para los motores usados. Inicialmente, se eligen los parámetros básicos del régimen del proceso: temperatura y velocidad del agente secador y la altura de la cama.

El régimen térmico se selecciona de acuerdo con las propiedades tecnológicas del material secado. Al fijar la velocidad del agente secador debe tenerse en cuenta que en los aparatos que carecen de aditamentos especiales de mezclado mecánico del material, el proceso de secado debe realizarse en el estado inicial de la fluidización en torbellino cuando comienza el mezclado intenso de todo el volumen de la cama. En este estadio de la fluidización disminuye la posibilidad de que se recalienten algunas zonas del material al ponerse en contacto con la parrilla distribuidora.

Los parámetros físico-térmicos del gas (aire) se hallan para las condiciones de entrada (iniciales). La altura óptima de la cama depende del gasto específico mínimo de calor y de energía eléctrica. Para condiciones muy parecidas, al aumentar la altura de la cama, la temperatura promedio de los gases de salida disminuye y esto conduce a una reducción del gasto térmico. Sin embargo, con la altura de la cama aumenta su resistencia al paso del agente fluidizante (caída de presión) y se incrementan los gastos de energía. De acuerdo con las investigaciones realizadas se puede decir que lo más racional es llevar a cabo el secado a alturas de cama de 200–300 mm.

Seleccionada la temperatura y la velocidad del agente secador, escogida la altura de la cama (carga específica del material sobre la parrilla distribuidora del gas) y conocida la humedad inicial del material, se determina la velocidad de secado del producto.

La velocidad de secado de granos en el período de velocidad de secado constante se puede calcular con la siguiente correlación:

$$N^c = [0,46(t_1 - 60)^{0,7} + k(w_1^c - 25) + 8] \cdot (vQ_g)^{0,5} \cdot (h_0Q_{ap})^{-0,5}, \quad (1)$$

donde: t_1 , temperatura del agente secador a la entrada de la cama; k , constante que depende de la temperatura del agente secador; w_1^c , humedad inicial del grano (referida a la masa del sólido seco); v , velocidad del agente secador en m/s; Q_g , densidad del agente secador a t_1 en kg/m³; h_0 , altura inicial de la cama en m; Q_{ap} , densidad aparente de la cama de granos en kg/m³.

Luego, se halla la duración del proceso de secado que depende de la temperatura máxima permisible del material a secar con la siguiente expresión:

$$\tau = C_g(100 + w_1^c) \{ 1 - [(A - B\theta)/A - B\theta_1]^{N^c C_h / B(100 + w_1^c)} \} / N^c C_h, \quad (2)$$

donde: C_g , capacidad calorífica del grano a la humedad inicial; C_h , capacidad calorífica de la humedad; A , B , coeficientes definidos como:

$$A = [(vQ_g C_p) / (h_0 Q_{ap}) - (0,05515 N^c) / (100 + w_1^c)] t_1 - (627,1 N^c / 100 + w_1^c),$$

$$B = [(vQ_g C_p / h_0 Q_{ap}) - (0,61515 N^c) / (100 + w_1^c)],$$

donde: θ_1 , temperatura inicial del material en °C; θ , temperatura del material al cabo del tiempo τ .

Una vez calculada la velocidad de secado y la duración del proceso se halla la disminución de humedad que tiene lugar en este período:

$$\Delta W = N^c \tau. \quad (3)$$

Con la productividad fijada del secador (G) y una vez hallada la duración del ciclo de calentamiento (τ), se puede calcular la cantidad de material que se puede procesar en la cámara de trabajo:

$$G_i = G / \tau. \quad (4)$$

Conocida la cantidad de material (G_i), se puede calcular el área de la parrilla distribuidora del gas:

$$F_p = G_i/h_0 Q_{ap} . \quad (5)$$

El procedimiento aplicado para calcular la etapa de enfriamiento siguiente es similar al anterior. Y, luego, las restantes etapas se diseñan repitiendo las operaciones descritas.

Datos iniciales

Los datos iniciales fueron obtenidos del trabajo de Guevara y Dager,⁵ Estos fueron: humedad inicial del arroz (base seca) 25%; humedad final, 12%; máxima temperatura permisible del grano, 40–50°C; capacidad del secador, 10 kg/h; temperatura del agente secador, 120–160°C; velocidad del agente secador, 2 m/s; altura inicial de la cama, 200 mm; velocidad del aire de enfriamiento, 1,7 m/s; calores específicos del arroz a diferentes humedades comprendidas dentro del intervalo de 12 a 25%; así como la densidad aparente de camas de arroz a diferentes alturas y contenidos de humedad.

Desarrollo del Trabajo y Resultados.

Primeramente, antes de plasmar los programas con el lenguaje FORTRAN 10 H haremos una breve explicación de cómo se realizaron los diseños para lograr un más fácil entendimiento e interpretación posterior de dichos programas.

El primer programa que se confeccionó fue para determinar cuáles son las combinaciones óptimas del secador simétrico, o sea, de cuál combinación de temperatura del agente secador a la entrada de la cama (t_1) y temperatura máxima del material (θ) resulta un número menor de etapas de calentamiento y enfriamiento para alcanzar la humedad del 12%.

Primero, se calcula la etapa 1 de calentamiento a velocidad de secado constante. La velocidad de secado se calcula con la expresión (1). Hallada la velocidad de secado del primer período, se calcula la duración de ese período con la ecuación (2). Luego, se determina la disminución de humedad, la humedad de salida, el peso del grano a la salida.

Se escogió como temperatura inicial del grano la temperatura ambiente media en la cosecha de primavera $\theta_1 = 26,3^\circ\text{C}$. A esta temperatura y con la humedad relativa promedio del aire atmosférico se halló su humedad y con ésta el calor específico de la mezcla aire-vapor de agua, que resultó ser igual a 0,263 kcal/kg°C.

Se calcula la disminución de humedad en la zona 1 de calentamiento con la ecuación (3), y la humedad del grano a la salida de esta etapa resulta.

$$W_2^c = W_1^c - \Delta W_1^c$$

En el diseño de la zona 1 de enfriamiento, zona 2 de calentamiento y 2 de enfriamiento, se supone que la velocidad de secado es igual al 75%, 90% y 65% respectivamente de la velocidad de secado en la zona 1 de calentamiento. Con estos valores de velocidad de secado se calculan la disminución de humedad y la humedad del grano a la salida de cada una de las zonas.

Para determinar los valores de la velocidad de secado en las otras zonas, se puede construir un gráfico con los valores de humedad de entrada a las zonas de calentamiento y enfriamiento ya diseñadas (w) contra los valores correspondientes de la velocidad de secado en esas zonas (N^c), se trazan las líneas rectas de w vs. N^c , y con éstas se pueden determinar los valores de la velocidad de secado.

Sin embargo, en este trabajo mediante un programa de cálculo matricial se determinaron los parámetros correspondientes a las dos rectas que describen la variación de la velocidad de secado en las etapas de calentamiento y enfriamiento. Y estas ecuaciones se introdujeron en el programa de diseño de las etapas haciéndose innecesario la utilización posterior del gráfico anterior.

Todo el procedimiento anterior se realiza con las siguientes combinaciones de temperatura: $t_1 = 120^\circ\text{C}$, $\theta = 40^\circ\text{C}$; $t_1 = 120^\circ\text{C}$, $\theta = 50^\circ\text{C}$; $t_1 = 160^\circ\text{C}$; $\theta = 50^\circ\text{C}$; $t_1 = 160^\circ\text{C}$, $\theta = 40^\circ\text{C}$; y de ellas se escoge aquella combinación que determina un menor número de etapas de calentamiento-enfriamiento.

Una vez determinadas las condiciones óptimas para el diseño del secador simétrico: $t_1 = 120^\circ\text{C}$ y $\theta = 50^\circ\text{C}$, en base al menor número de etapas de calentamiento-enfriamiento, que resultaron ser 11, se escoge esa condición de temperaturas para el diseño tecnológico del equipo. El tiempo de duración de cada ciclo o zona es de $\tau = 48,0514$ s y los valores de velocidad de secado y humedad a la salida de cada zona son obtenidos con el programa de cálculo de las condiciones óptimas (Fig. 1 y Tabla I).

Luego, se calcula la temperatura del grano a la salida de cada zona, que como se dijo antes no puede sobrepasar los 50°C , ya que sino el grano sufre deterioro en su calidad. En este cálculo se aplica la ecuación:

$$\theta = A - (A - B\theta_2) \left[(1 - N^c \tau / (100 + w^c_1)) (C_g) \right]^{B(100 + w^c_1) / N^c} / B. \quad (6)$$

Cuando en las zonas de calentamiento, para las condiciones dadas, la temperatura de salida del grano es superior a 50°C , se procede a calcular la temperatura del agente secador a la entrada de la zona de calentamiento fijando la temperatura de salida

del grano en 50°C. La temperatura del gas se halla aplicando la ecuación:

$$t_1 = \{50 B - B\theta_2 [1 - N^c \tau / (100 + w^{c_1}) C_g]^{B(100 + w^{c_1}) / N^c} / 1 - [1 - N^c \tau / (100 + w^{c_3}) + 627,1 N^c / 100 + w^{c_1}] \cdot [(\nu_0 G_p) / G_1 / F_p] - (0,05515 N^c) / 100 + w^{c_1}\}^{-1}. \quad (7)$$

La cantidad de humedad evaporada W , kg/h se calcula con la ecuación:

$$w = G_1 (w^{c_1} - w^{c_2}) / 100 + w^{c_1}, \quad (8)$$

donde: w_1^c y w_2^c humedades del material a la entrada y salida de la etapa considerada.

La masa de granos a la salida de cada zona G_2 , kg/h se determina con la relación

$$G_2 = G_1 [1 - (w^{c_1} - w^{c_2}) / (100 + w^{c_1})]. \quad (9)$$

Estos pasos se repiten en cada una de las etapas hasta que se alcanza la humedad final del grano fijada inicialmente. Entonces, se calcula el consumo de calor por kg de humedad evaporada:

$$q = (V_{1-cal} / V_{0-1}) \cdot (I_1 - I_0) + (V_{2-cal} / V_{0-2}) (I_2 - I_0) + \dots \\ \dots + (V_{11-cal} / V_{0-11}) \cdot (I_{11} - I_0) / \Sigma w, \quad (10)$$

donde: I_1, I_2, \dots , entalpía del agente secador a la entrada de la primera, segunda zona de calentamiento, respectivamente; I_0 , entalpía del aire atmosférico; V_{0-1}, V_{0-2}, \dots , volumen húmedo del aire en m³/kg de aire seco a los parámetros iniciales del agente secador a la entrada de la primera, segunda, ... zona de calentamiento.

Finalmente se calcula la potencia requerida de los motores de los ventiladores de las zonas de calentamiento y enfriamiento. En este caso se decidió utilizar la relación:

$$N_c = (V_1 \cdot H) / (3600 N_v N_m N_t), \quad (11)$$

donde: V_1 , flujo volumétrico del agente secador y de enfriamiento; H , suma de las resistencias hidráulicas provocadas por la cama fluidizada y el conducto gaseoso; N_v , eficiencia del ventilador; N_m , eficiencia mecánica del ventilador; N_t , eficiencia del transmisor que va del motor al ventilador. Los valores de las eficiencias utilizados fueron: $N_v = 0,6$; $N_m = 0,96$ y $N_t = 0,95$.

CONCLUSIONES

En general, se puede concluir que para las condiciones de operación establecidas, considerando sólo el número mínimo de etapas de calentamiento-enfriamiento, con el programa de desarrollo es posible hallar todas las condiciones de operación de un secador de arroz oscilatorio simétrico, y el mismo posibilita la optimización del proceso tomando en cuenta criterios económicos sobre: la cantidad de energía consumida en los equipos utilizados y el costo del secador (que es función del número de etapas).

TABLA I

Resultados de las condiciones óptimas del proceso oscilatorio simétrico.

Temperatura del agente secador a la entrada: 119,9
Temperatura máxima permisible del grano: 49,9
Tiempo de secado: 48,051 s

| Velocidad de secado | Humedad a la salida de la zona | Número de la zona |
|---------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1,253 | 23,996 | 1 |
| 0,940 | 23,243 | 2 |
| 1,128 | 21,339 | 3 |
| 0,814 | 21,686 | 4 |
| 1,078 | 20,822 | 5 |
| 0,769 | 20,206 | 6 |
| 1,006 | 19,400 | 7 |
| 0,701 | 18,839 | 8 |
| 0,939 | 18,086 | 9 |
| 0,638 | 17,575 | 10 |
| 0,878 | 16,871 | 11 |
| 0,580 | 16,407 | 12 |
| 0,821 | 15,749 | 13 |
| 0,526 | 15,328 | 14 |
| 0,768 | 14,712 | 15 |
| 0,476 | 14,330 | 16 |
| 0,720 | 13,753 | 17 |
| 0,430 | 13,408 | 18 |
| 0,675 | 13,868 | 19 |
| 0,388 | 12,557 | 20 |
| 0,633 | 12,049 | 21 |
| 0,349 | 11,760 | 22 |

TABLA II

Resultados del diseño tecnológico del secador a escala de laboratorio operado a régimen oscilatorio simétrico.

Área de secado: 0,001266 m²

Diámetro de la cámara de secado 0,0401 m

Cantidad de aire caliente: 9,117 m³/h

Cantidad de aire de enfriamiento: 7,760 m³/h

| Etapa | Humedad evaporada, kg | Masa de granos, kg/h | Temperatura del grano, °C | Temperatura del gas, °C |
|-------|-----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 0,080 | 9,91 | 47,87 | 119,9 |
| 2 | 0,060 | 9,85 | 34,90 | 26,3 |
| 3 | 0,072 | 9,78 | 49,13 | 119,9 |
| 4 | 0,052 | 9,73 | 35,47 | 26,3 |
| 5 | 0,069 | 9,66 | 49,86 | 119,9 |
| 6 | 0,049 | 9,61 | 35,49 | 26,3 |
| 7 | 0,064 | 9,48 | 50,0 | 102,8 |
| 8 | 0,044 | 9,44 | 35,69 | 26,3 |
| 9 | 0,059 | 9,38 | 50,0 | 100,3 |
| 10 | 0,040 | 9,34 | 36,89 | 26,3 |
| 11 | 0,055 | 9,28 | 50,0 | 98,15 |
| 12 | 0,036 | 9,25 | 36,08 | 26,3 |
| 13 | 0,052 | 9,19 | 50,0 | 96,09 |
| 14 | 0,033 | 9,16 | 36,27 | 26,3 |
| 15 | 0,048 | 9,11 | 50,0 | 94,19 |
| 16 | 0,030 | 9,08 | 36,45 | 26,3 |
| 17 | 0,045 | 9,03 | 50,0 | 92,43 |
| 18 | 0,027 | 9,11 | 36,62 | 26,3 |
| 19 | 0,042 | 8,96 | 50,0 | 90,81 |
| 20 | 0,024 | 8,94 | 36,78 | 26,3 |
| 21 | 0,040 | 8,90 | 50,0 | 89,31 |
| 22 | 0,022 | 8,88 | 36,93 | 26,3 |

Potencia de los ventiladores para las zonas de calentamiento: 262,717 kg/.m/s.

Consumo de calor por kg de humedad evaporada: 182,077 Kcal/kg

Potencia de los ventiladores para las zonas de enfriamiento: 223,310 kg.m/s

RECONOCIMIENTOS

Al compañero Ramón Lambert Fernández por la valiosa colaboración que nos brindó en las pruebas y ejecución de los programas.

Al Centro de Cálculo de JUCEPLAN de Santiago de Cuba por las facilidades ofrecidas para el uso de la Computadora IRIS-10.

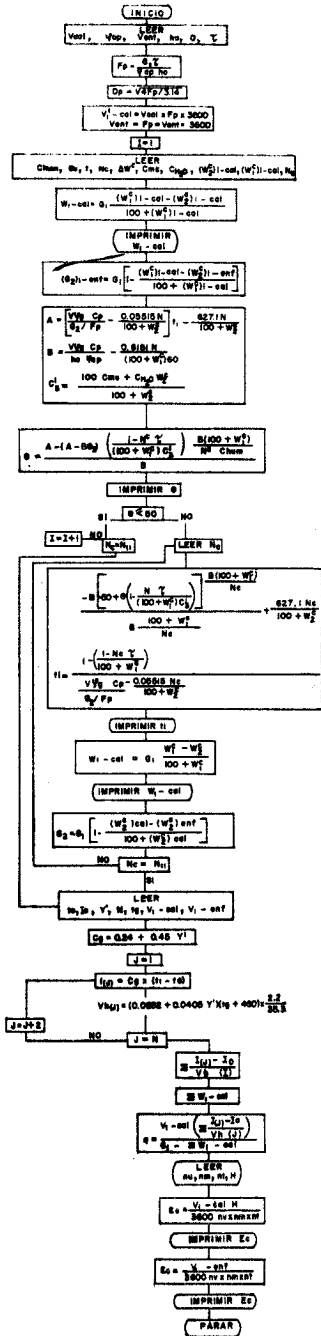


Fig. 2 Diagrama de bloque para el diseño del secador fluidizado a régimen oscilatorio simétrico para las condiciones $t_2 = 120, ^\circ\text{C}$ y $\theta = 50 ^\circ\text{C}$.

Nomenclatura para el programa del cálculo de las condiciones óptimas.

N = variable de conteo; N_1 = variable de conteo; $H = h_0$, altura inicial de la cama, m; $Q = w^c_1$, humedad inicial del grano (base seca), %; $R = w_x$ humedad del grano (base seca), %, $V = v$, velocidad del agente secador, m/s; $A = Q_{ap}$ densidad aparente de la cama de granos, kg/m^3 ; $B = C_p$, capacidad calorífica del aire húmedo, kcal/gk°C; $C = C_{m,s}$, capacidad calorífica del arroz seco, kcal/kg°C; $E = C_h$, capacidad calorífica del agua, kcal/kg°C; $T = t_1$, temperatura del agente secador a la entrada de la cama, °C; $BM = \theta$, temperatura máxima del arroz, °C; $D = Q_g$, densidad del agente secador a t_1 , kg/m^3 ; $AK = k$, constante que depende de la temperatura del agente secador; $AN_1 = N^c$, velocidad de secado en el período de velocidad de secado constante, %/min; $Y = A$, coeficiente de la ecuación (2); $Z = B$, coeficiente de la ecuación (2); $TJ = \tau$, tiempo de secado, s; $Q_2 = w^c$, humedad del grano a la salida de cada etapa, %; $CK = K$, porciento de disminución de la velocidad de secado; $AN = N^c$, velocidad de secado en cada etapa, %/min; AL, BL, CL, DL, coeficientes que definen las rectas que describen la variación de la velocidad de secado del grano en las etapas de calentamiento y enfriamiento respectivamente.

Nomenclatura para el programa del diseño del secador fluidizado a régimen oscilatorio simétrico.

$D = Q_{ap}$, densidad aparente de la cama de granos, kg/m^3 ; $V = v$, velocidad del agente secador en la zona de calentamiento, m/s; $H = h_0$, altura inicial de la cama, m; $G_2 = G_1$, masa de granos a la salida de cada zona $kg/hé$ $T = \tau$, tiempo de secado, duración de cada zona, s; $VE = v$, velocidad agente secador en la zona de enfriamiento, m/s; $AN_9 = N_{t1}$, velocidad de secado en la oncen zona de enfriamiento, %/min; $CM = C_{m,s}$, capacidad calorífica del arroz seco, kcal/kg°C; $CP = C_p$, capacidad calorífica del aire húmedo, kcal/kg°C; $E_2(1) = t$, temperatura del agente secador en la primera zona de calentamiento, °C; $E_2(2) = t$, temperatura del agente secador en la primera zona de enfriamiento, °C; $DM_2(1) = \theta$, temperatura del aire de enfriamiento, °C; $DM_2(2) = \theta$, temperatura inicial del grano, °C; $ENF = \theta$, temperatura del grano en las zonas de enfriamiento, °C; $FP = F_p$, área de la parrilla distribuidora, m^2 ; $DP = D_p$, diámetro de la cámara de trabajo, m; $S = V_{cal}$, flujo volumétrico del aire caliente, m^3/h ; $U = V_{enf}$, flujo volumétrico del aire frío, m^3/h ; $AN = N_c$, velocidad de secado del grano en cada zona, %/min; $Q_3 = w^c_2$, humedad del grano a la salida de cada zona, %; $V_1 = v$, velocidad del agente secador en las zonas de enfriamiento, m/s; $D_1 = Q_g$, densidad del agente secador, kg/m^3 ; $Q_1 = w^c_1$, humedad del grano a la entrada de cada zona, %; $P = W$, cantidad de humedad evaporada en cada zona, kg/h ; $A = A$, coeficiente de la ecuación (2); $B = B$, coeficiente de la ecuación (2); $C = C_g$, capacidad calorífica del grano a la humedad inicial, kcal/kg°C; $BM = \theta$ temperatura del grupo a la salida de cada zona, °C; $E_2(II) = t$, temperatura del agente secador en las zonas de calentamiento cuando la temperatura del grano sobrepasa los 50°C, °C; $N = N$, variable de conteo; $F = t_0$, temperatura de referencia, °C; $G = I_0$, entalpía del aire atmosférico a la temperatura de referencia, kcal; $R = t_g$, temperatura del gas en cada zona de calentamiento °C; $CG = C_p$, capacidad calorífica del gas kcal/kg°C; $B_18(J) = I$, entalpía del agente secador a la entrada de cada zona de calentamiento, kcal; $VH(J) = V_0$, volumen húmedo del aire a los parámetros iniciales, a la entrada de cada zona de calentamiento, m^3/kg de aire seco; $QM = q$, consumo de calor por kg de humedad evaporada, kcal/kg de humedad evaporada; $Z = N$, eficiencia mecánica del ventilador; $X = N_v$, eficiencia del ventilador; $UV = N_t$, eficiencia del transmisor que va del motor al ventilador; $DC = H'$, suma de las resistencias hidráulicas de la cama fluidizada y del conducto gaseoso, kg/m^3 ; $TNC = N$, potencia requerida de los motores de las zonas de calentamiento; $TNE = N_c$, potencia requerida de los motores de las zonas de enfriamiento, $kg./m/s$.

REFERENCIAS

1. GUINZBURS A. S. y REZCHIKOV V. A. Trad. de Meinardo Boizán, Universidad de Oriente, 1973.
2. LIUBOSHIC I. L.; SLOBODKIN L. S. y PIKUS, I. F. Trad. de Meinardo-Boizán, Universidad de Oriente, 1974
3. LIUBOSHIC I. L. y PIKUS I. F. Editorial Nauka i Tejnika, Minsk, 1966.
4. BUROVOI I. A. y SVETZAROVA G. I. Khim. Prom. 41, 407, 1965.
5. GUEVARA G. y DÁGER I. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, 1973.