

УДК 677.212

DOI 10.47367/0021-3497_2021_1_46

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ХЛОПКА-СЫРЦА
В БАРАБАННОЙ СУШИЛКЕ**

**DETERMINING OF THE HEAT-MOISTURE STATE OF RAW COTTON
IN A DRUM DRYER**

А.З. МАМАТОВ, Х.Н. ПАРДАЕВ, Ж.Ш. МАРДОНОВ, А.Ф. ПЛЕХАНОВ

A.Z. MAMATOV, X.N. PARDAEV, J.SH. MARDONOV, A.F. PLEKHANOV

(Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан,
Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan,
Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: maz54@mail.ru; hanimkul@bk.ru; jahongir.mardonov.93@bk.ru; plekhanov-af@rguk.ru

В статье рассматривается задача определения тепловлажностного состояния хлопка-сырца при сушке в барабанных сушилках. Предложена математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений параболического типа относительно температуры и влажности хлопка-сырца. Построено приближенное решение по методу Галеркина рассматриваемой задачи, проведен сравнительный анализ численных результатов с экспериментальными данными. Показано, что предлагаемая математическая модель и ее приближенное решение адекватно описывают процесс сушки хлопка-сырца.

In the article was discussed the problem of determining the warm-wet state of raw cotton during drying in drum dryers. A mathematical model is proposed in the form of a system of differential equations of parabolic type with respect to temperature and humidity of raw cotton. An approximate solution is constructed by the Galerkin method of the problem under consideration, a comparative analysis of numerical results with experimental data was carried out. It has been shown that the proposed mathematical model and its approximate solution adequately describe the drying process of raw cotton.

Ключевые слова: математическая модель, метод, сушилка, хлопок-сырец.

Keywords: mathematical model, method, dryer, raw cotton.

К основным недостаткам существующей технологии сушки хлопка-сырца, приводящим к ухудшению качества волокна, относятся неравномерность сушки и перегрев, пересушка волокнистой массы. В результате этого волокно становится хрупким и ломким, ухудшаются его структурные и механические свойства. При этом актуальной научной задачей становится определение роли методов теоретического изучения тепловлажностного состояния хлопка-сырца при его сушке в барабанных сушилках [1...3].

В научной литературе нет достаточной информации о законе изменений тепловлажностных характеристик состояния хлопка-сырца и его компонентов в процессе технологической сушки. Поэтому задача изучения этих показателей с помощью математических моделей является актуальной с точки зрения управления технологическими параметрами в процессе технологической переработки и подготовке хлопка-сырца к процессу джинирования.

Рассмотрим математическую модель решения задачи сушки хлопка-сырца в прямоугольной барабанной сушилке. Предположим, что происходит конвективный теплообмен между хлопком-сырцом и воздухом. Тогда для определения температуры и влажности хлопка-сырца при его сушке составим начально-краевую задачу параболического типа [4] в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \frac{\partial T}{\partial x} - \alpha_{11}(T - T_B) + \alpha_{12} \frac{\partial W}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \frac{\partial W}{\partial x}. \end{cases} \quad (1)$$

с начальными граничными условиями:

$$T(x,0)=T_0(x), \quad W(x,0)=W_0(x),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, & \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=1} &= 0, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, & \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} &= 0, \\ a &= \frac{\lambda}{c\rho}, & a_m &= \frac{100\lambda_m}{c_m\rho}, \\ \alpha_{11} &= \frac{\alpha}{\rho}, & \alpha_{12} &= \frac{\varepsilon r_{21}}{100c}, \end{aligned}$$

где T , T_B – соответственно температура хлопка-сырца и сушильного агента (воздуха); W – влажность хлопка-сырца; c , λ , ρ , v , – соответственно теплоемкость, теплопроводность, плотность и скорость движения хлопка-сырца; α – объемный коэффициент теплообмена между хлопком-сырцом и воздухом; ε – коэффициент фазового превращения; r_{21} – теплота парообразования; τ – время сушки; ℓ – длина барабана.

Для решения данной задачи воспользуемся методом Галеркина для приближенного решения краевых задач для дифференциального уравнения. Введем два набора базисных функций и обозначим их через $\{\varphi_i\}$, $\{\psi_i\}$. От элементов базисных функций потребуем, чтобы они обладали второй производной по пространственным переменным.

Определим приближенные решения системы в виде [5]:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^N c_k(\tau) \phi_k(x), \\ U &= \sum_{ki=1}^N d_k(\tau) \psi_k(x), \end{aligned} \quad (2)$$

где коэффициенты $c_k(\tau)$, $d_k(\tau)$, определяемые из системы:

$$\int_0^{\ell} \frac{\partial T}{\partial \tau} \phi_i(x) dx = a \int_0^{\ell} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \phi_i(x) dx - \vartheta \int_0^{\ell} \frac{\partial T}{\partial x} \phi_i(x) dx -$$

$$- \alpha_{11} \int_0^{\ell} (T - T_B) \phi_i(x) dx + \alpha_{12} \int_0^{\ell} \frac{\partial W}{\partial \tau} \phi_i(x) dx,$$

$$\int_0^{\ell} \frac{\partial W}{\partial \tau} \psi_i(x) dx = a_m \int_0^{\ell} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \psi_i(x) dx + a_m \delta \int_0^{\ell} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \psi_i(x) dx - \vartheta \int_0^{\ell} \frac{\partial W}{\partial x} \psi_i(x) dx.$$

Используя формулу интегрирования по частям и учитывая граничные условия, получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N \alpha_{ik} c'_k + \sum_{k=1}^N \beta_{ik} c_k + \sum_{k=1}^N \gamma_{ik} d_k = \bar{f}_{1i}, \\ \sum_{k=1}^N \bar{\alpha}_{ik} d'_k + \sum_{k=1}^N \bar{\beta}_{ik} c_k + \sum_{k=1}^N \bar{\gamma}_{ik} d_k = \bar{f}_{2i} \end{cases} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N \alpha_{ik} c_k(0) = \int_0^{\ell} T_0(x) \phi_k(x) dx, \\ \sum_{k=1}^N \bar{\alpha}_{ik} d_k(0) = \int_0^{\ell} U_0(x) \psi_k(x) dx, \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha_{ik} = \int_0^{\ell} \phi_i(x) \phi_k(x) dx$, $\bar{\alpha}_{ik} = \int_0^{\ell} \psi_i(x) \psi_k(x) dx$.

Системы (3) и (4) напомним векторном виде:

$$\begin{cases} Q_n \frac{dC_n(\tau)}{d\tau} + P_n C_n(\tau) + G_n D_n(\tau) = F_{1n}(\tau), \\ \tilde{Q}_n \frac{dD_n(\tau)}{d\tau} + \tilde{P}_n D_n(\tau) + \tilde{G}_n C_n(\tau) = F_{2n}(\tau), \\ Q_n C_n(0) = F_{10}, \\ \tilde{Q}_n D_n(0) = F_{20}, \end{cases} \quad (5)$$

где $Q_n = (\alpha_{ik})$, $P_n = (\beta_{ik})$, $G_n = (\gamma_{ik})$, $\tilde{Q}_n = (\bar{\alpha}_{ik})$, $\tilde{P}_n = (\bar{\beta}_{ik})$ и $\tilde{G}_n = (\bar{\gamma}_{ik})$ – квадратные матрицы размером $(N \times N)$; $C_n(\tau) = (c_1(\tau), c_2(\tau), \dots, c_n(\tau))^T$; $D_n(\tau) = (d_1(\tau), d_2(\tau), \dots, d_n(\tau))^T$ – искомые векторы; $F_{1n}(\tau) = (f_{11}(\tau), f_{12}(\tau), \dots, f_{1n}(\tau))^T$, $F_{2n}(\tau) = (f_{21}(\tau), f_{22}(\tau), \dots, f_{2n}(\tau))^T$ – за-

данные векторы; $F_{10}(\tau) = (f_{01}(\tau), f_{02}(\tau), \dots, f_{0n}(\tau))^T$ – элементы векторов и $F_{20}(\tau) = (\tilde{f}_{01}(\tau), \tilde{f}_{02}(\tau), \dots, \tilde{f}_{0n}(\tau))^T$ – определяются из правой части уравнений системы (4).

Как известно из теории обыкновенных дифференциальных уравнений, при невырожденности и положительной определенности матрицы, составленных из коэффициентов системы, задача (5) имеет единственное решение.

Для численного решения задачи (5) используем метод разностных схем по временной переменной, и, строя неявные разностные схемы на отрезке $[0; 1]$, получим систему алгебраических уравнений, которая решена методом Гаусса. Найденные значения $C_n^1(\tau)$, $D_n^1(\tau)$ подставляем в (2), находим температуру и влажность хлопка-сырца в процессе сушки.

Расчеты решения предложенного метода определения температуры и влажности хлопка-сырца проводились при следующих значениях параметров: $\lambda = 0,09$ Вт/м·К; $C = 1700$ ж/(кг·°C); $\rho = 40$ кг/м³; $W_n = 14,3\%$; $T_n = 10^\circ$; $T_B = 100^\circ$; 200° ; $\varepsilon = 0,8$; $r_{21} = 2082000$ ж/кг; $v = 1,5$ м/с; $\alpha = 124$ Вт/(м³·°C).

Для сравнения расчетных и экспериментальных данных воспользуемся результатами экспериментальных исследований, которые проводились в барабанных сушилках типа 2СБ-10. При проведении испытаний объектом переработки служил хлопок-сырец машинного сбора, 2-4 промышленных сортов с исходной влажностью 14,3% [3].

Расчетные изменения влажности хлопка-сырца по длине барабана приведены в табл. 1. Расчетные изменения температуры хлопка-сырца по длине барабана приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

| Длина барабана | Влажность хлопка-сырца при $W_H=14,3\%$, $T_B=100^\circ\text{C}$ | Влажность хлопка-сырца при $W_H=14,3\%$, $T_B=200^\circ\text{C}$ |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0 | 14,3 | 14,3 |
| 2 | 14,11 | 13,72 |
| 4 | 13,95 | 12,55 |
| 6 | 13,68 | 11,71 |
| 8 | 13,31 | 11,32 |
| 10 | 13,02 (13,37 – экспериментальный) | 10,98 (11,49 – экспериментальный) |

Т а б л и ц а 2

| Длина барабана | Температура хлопка-сырца при $W_H=14,3\%$, $T_B=100^\circ\text{C}$ | Температура хлопка-сырца при $W_H=14,3\%$, $T_B=200^\circ\text{C}$ |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 0 | 10 | 10 |
| 2 | 14,8 | 21,4 |
| 4 | 23,7 | 35,7 |
| 6 | 27,9 | 47,1 |
| 8 | 32,1 | 53,3 |
| 10 | 36,8 (35 – экспериментальный) | 58,1 (56 – экспериментальный) |

ВЫВОДЫ

Сравнение экспериментальных данных изменения влажности и температуры хлопка-сырца в барабанной сушилке 2СБ-10 и результаты расчетов по приближенному решению показывают, что погрешность расчетов составляет не более 5%. Это позволяет использовать рассмотренный алгоритм для вычисления температуры и влагосодержания хлопка-сырца в процессе сушки в прямоточных барабанных сушилках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parpiev A.P., Kayumov A.H., Pardayev H. Effect of temperature of steady heating components of cottonseed at drying process// European science review. –V. 7-8, 2016. P.205...207.
2. Parpiyev A.P., Kayumov A.H. Axmatov N. Definition of area of soft temperature drying condition // European science review. – V.7-8, 2016. p.208...211.
3. Parpiyev A.P., Kayumov A.H. Analytical review of the applied temperature in the process of drying raw cotton // Scientific and Technical Journal of Fer PI. – V.1, 2017. P.29...34.

4. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978.

5. Михлин С.Г. Численная реализация вариационных методов. – М.: Наука, 1966.

REFERENCES

1. Parpiev A.P., Kayumov A.H., Pardayev H. Effect of temperature of steady heating components of cottonseed at drying process// European science review. –V. 7-8, 2016. P.205...207.
2. Parpiyev A.P., Kayumov A.H. Axmatov N. Definition of area of soft temperature drying condition // European science review. – V.7-8, 2016. p.208...211.
3. Parpiyev A.P., Kayumov A.H. Analytical review of the applied temperature in the process of drying raw cotton // Scientific and Technical Journal of Fer PI. – V.1, 2017. P.29...34.
4. Lykov A.V. Teplomassoobmen. – М.: Energiya, 1978.
5. Mikhlin S.G. Chislennaya realizatsiya variatsionnykh metodov. – М.: Nauka, 1966

Рекомендована кафедрой текстильных технологий РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 07.06.20.