

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАГРЕВА КОМПОНЕНТОВ ХЛОПКА-СЫРЦА

Каюмов Абдул-малик Хамидович. Наманганский Государственный технический университет. Доктор технических наук (DSc), профессор.

Аннотация: Темп нагрева компонентов хлопко-сырца существенно влияет на равномерности сушки волокна и семян. В статье теоретически и экспериментально определены закономерности распространения тепла в комке хлопко-сырца и его компонентах в зависимости от исходной влажности сырья, температуры сушильного агента и продолжительности процесса сушки с использованием проекционного метода Бубнова-Галеркина, который даёт возможность анализировать темпа нагрева волокна и семян и использовать при выборе оптимального режима сушки хлопко-сырца с максимальным сохранением качества при обеспечения равномерности нагрева их компонентов.

Ключевые слова: сушка, время сушки, температура, нагрев, хлопок-сырец, волокно, семена, теплообмен, равномерность сушки.

THEORETICAL ANALYSIS OF HEATING OF RAW COTTON COMPONENTS

Kayumov Abdul-malik Khamidovich. Namangan State Technical University. Doctor of Technical Sciences (DSc), professor.

Abstract: The rate of heating of raw cotton components significantly affects the uniformity of drying of fiber and seeds. The article theoretically and experimentally determines the patterns of heat propagation in a lump of raw cotton and its components depending on the initial moisture content of the raw material, the temperature of the drying agent and the duration of the drying process using the Bubnov-Galerkin projection method, which makes it possible to analyze the heating rate of fiber and seeds and use it when choosing the optimal drying mode for raw cotton with maximum quality preservation while ensuring uniform heating of their components.

Key words: drying, drying time, temperature, heating, raw cotton, fiber, seeds, heat exchange, uniformity of drying.

Введение. Для равномерной сушки хлопко-сырца и его компонентов необходимо обеспечить их равномерный нагрев, изучение которого является актуальным вопросом при организации процесса сушки. Известно [1-3], что чем меньше значение температуры нагрева, тем меньше вероятность ухудшения их природных свойств.

В работах [4-6] проведен анализ исследований по влиянию температуры сушильного агента на качественные показатели компонентов хлопко-сырца и на равномерность сушки при различных условиях процесса и состояниях высушиваемого материала. В производственных условиях хлопок-сырец сушатся в конвективном способе в виде комков. Важное значение для сохранения качества волокна и семян во время сушки имеет темп распространения тепла в комке хлопко-сырца и его компонентах. В связи с этим нами рассмотрена задача распространения тепла в комке хлопко-сырца.

Теоретические исследования: Задачу тепло и массообмена в комке хлопко-сырца можно выразить следующим образом: Дано неоднородное двух компонентное сферическое тело радиуса R , обладающее свойством изотропности, с известным начальным распределением температуры: $u_1(0,r)=g_1(r)$, $u_2(0,r)=g_2(r)$, -начальная температура семян и волокна, находящийся на расстоянии r от центра комка; внутри тела происходит конвективный теплообмен между компонентами (между семенем и волокном). На поверхности контакта со средой происходит конвективный теплообмен по закону Ньютона, при этом нагревание тела происходит равномерно по всей поверхности тела. Требуется найти радиальное распределение температуры компонентов тела в любой момент времени [7-8].

Тогда опираясь на законы термодинамики (законы теплопроводности Фурье, Ньютона, сохранение энергии и т.д.) данную задачу можно сформулировать в виде системы дифференциальных уравнений параболического типа:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) + \frac{\alpha}{c_1 \rho_1} [u_2 - u_1] + \frac{1}{c_1 \rho_1} f_1(\tau) \\ \frac{\partial u_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial r} \right) + \frac{\alpha}{c_2 \rho_2} [u_1 - u_2] + \frac{1}{c_2 \rho_2} f_2(\tau) \end{cases} \quad (1)$$

с начальными

$$u_1(r, 0) = g_1(r), \quad u_2(r, 0) = g_2(r), \quad (2)$$

и граничными условиями: при $r=R$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u_1}{\partial r} + \alpha_1 [u_B - u_1] &= 0 \\ -\frac{\partial u_2}{\partial r} + \alpha_2 [u_B - u_2] &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где α_1 - коэффициент теплообмена между семенем и теплоносителем; α_2 - коэффициент теплообмена между волокном и теплоносителем; α - коэффициент теплообмена между семенем и волокном; $f_1(\tau)$, $f_2(\tau)$ - заданные непрерывные функции описывающие процесс испарения влаги из семени и из волокна, соответственно, u_B - температура воздуха, τ - время процесса сушки; $u_1(r, \tau)$, $u_2(r, \tau)$ - искомые функции представляющие температуру семени и волокна в точке r в данный момент времени τ .

Алгоритм решения задачи определения температурного поля компонентов хлопко-сырца получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} Q_n \cdot \frac{dA_{1n}(\tau)}{d\tau} + P_n A_{1n}(\tau) + G_n A_{2n}(\tau) = F_{1n}(\tau, r) \\ Q_n \cdot \frac{dA_{2n}(\tau)}{d\tau} + P_n A_{2n}(\tau) + G_n A_{1n}(\tau) = F_{2n}(\tau, r) \\ Q_n A_{1n}(0) = F_{10}(r) \\ Q_n A_{2n}(0) = F_{20}(r) \end{cases} \quad (4)$$

где $Q_n = (\alpha_{ik})$, $P_n = (\beta_{ik})$, $G_n = (\gamma_{ik})$, $\tilde{P}_n = (\tilde{\beta}_{ik})$ и $\tilde{G}_n = (\tilde{\gamma}_{ik})$ квадратные матрицы размером $(N \times N)$; $A_{1n}(\tau) = (a_{11}(\tau), a_{12}(\tau), \dots, a_{1n}(\tau))^T$, $A_{2n}(\tau) = (a_{21}(\tau), a_{22}(\tau), \dots, a_{2n}(\tau))^T$ - искомые векторы; $F_{1n}(\tau, r) = (f_{11}(\tau, r), f_{12}(\tau, r), \dots, f_{1n}(\tau, r))^T$, $F_{2n}(\tau, r) = (f_{21}(\tau, r), f_{22}(\tau, r), \dots, f_{2n}(\tau, r))^T$ известные векторы, элементы которые определяются по выше указанным формулам; элементы векторов $F_{10}(r) = (f_{01}(r), f_{02}(r), \dots, f_{0n}(r))^T$ и $F_{20}(r) = (\tilde{f}_{01}(r), \tilde{f}_{02}(r), \dots, \tilde{f}_{0n}(r))^T$ определяются из соотношении $f_{0i} = (rg_1(r), \varphi_i(r))$, $\tilde{f}_{0i} = (rg_2(r), \varphi_i(r))$.

Об устойчивости метода галеркина для одной задачи теплопереноса в комке хлопко-сырца.

Исследуем вопрос об устойчивости задачи (4). Допустим, что координатная система $\{\varphi_i(x)\}$ сильно минимальна в пространстве $L_2(\Omega)$ т.е. существует такая постоянная независимая от n , что $0 < q < q_i^n$, где q_i^n - собственные числа матрицы

$$Q_n = \{(\varphi_k, \varphi_j)_{L_2}\}_{k,j=1}^n$$

Предположим, что вместо системы Галеркина мы решаем «возмущенную» систему

$$\begin{cases} (Q_n + \Gamma_n) \tilde{C}_n(\tau) + (P_n + \Gamma_n^*) \tilde{C}_n = F_n(\tau) + \varepsilon_n \\ (Q_n + \Gamma_n^0) \tilde{C}_n(0) = F_0 + \varepsilon_0 \end{cases} \quad (5)$$

где $\tilde{C}_n(\tau) = (\tilde{A}_{1n}(\tau); \tilde{A}_{2n}(\tau))$ - решение возмущенной задачи.

Рассмотрим приближенный метод расчета модели (4), построенной для задачи теплопереноса в комке хлопко-сырца, т.е.

Для получения численных результатов выбираем базисных функции. В качестве базисных функции берем кусочно-непрерывных функции определяющих в пространстве $L_2(\Omega)$, т.е.

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_0(r) = 0 \\ \varphi_i(r) = \frac{1}{\sqrt{h}} \begin{cases} \frac{r-r_{i-1}}{h}, & \text{если } r \in (r_{i-1}; r_i) \\ \frac{r_{i+1}-r}{h}, & \text{если } r \in (r_i; r_{i+1}) \end{cases} \\ \varphi_N(r) = \frac{1}{\sqrt{h}} \begin{cases} \frac{r-r_{N-1}}{h}, & \text{если } r \in (r_{N-1}; r_N) \\ 0, & \text{если } r \notin (r_{N-1}; r_N) \end{cases} \end{array} \right.$$

построенные на сетке $0 < r_0 < r_1 < r_2 < \dots < r_N = R$, $h = r_i - r_{i-1}$, $i = 1, 2, 3, 4, \dots, N-1$.

Очевидно, эта система линейно независима и каждая из них отлично от нуля лишь в интервале длиной $2h$. Если обозначим линейную оболочку через H_N , то функции из H_N являются непрерывными кусочно-линейными функциями обладающими суммируемой с любой конечной производной, т.е. $H_N \in L_2[0; R]$, $H_N \in W_2^1[0; R]$. Также можно отметить, что эти функции почти ортогональны, т.е. только для соседних функций скалярное произведение в $L_2[0; R]$ отлично от нуля. Отсюда следует, что система уравнений (9) имеет разреженную матрицу. Подбирая, базисных функции таким образом и строя неявные разностные схемы на отрезке $[0; T]$ получим систему алгебраическую уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} (Q_n + \Delta \tau P_n) \cdot A_n^{l+1}(\tau) + G_n B_n^{l+1}(\tau) = F_{1n}^l(\tau) - Q_n A_n^l(\tau) \\ \tilde{G}_n A_n^{l+1}(\tau) + (Q_n + \Delta \tau \tilde{P}_n) \cdot B_n^{l+1}(\tau) = F_{2n}^l(\tau) - Q_n B_n^l(\tau) \\ Q_n A_n^0(\tau) = F_{10} \\ Q_n B_n^0(\tau) = F_{20} \end{array} \right. \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots, M \quad (6)$$

Система алгебраических уравнений (5) решена методом Гаусса. Найденные значение $A_n^l(\tau)$, $B_n^l(\tau)$ подставляя (6) и находим температуры волокна и семян, т.е.

$$u_i(r, \tau) = \frac{1}{r} \cdot \theta_i(r, \tau), \quad i = 1, 2.$$

Объекты и методы исследования: Объектом исследования выбрано хлопок-сырец, разновидности С6524, II промышленного сорта. Ниже в таблице 1 приведены результаты расчета, полученные при следующих значениях параметров модели (1) [7].

- для семени: $u_{10} = 10^0 \text{C}$; $\lambda_1 = 0,26 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $c_1 = 1800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $\rho_1 = 50 \text{ кг/м}^3$; $R_1 = 0,006 \text{ м}$; $k_1 = 0,005 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $W_{H1} = 19\%$; $\alpha = 2,30 \text{ Дж/м}^2\cdot\text{ч}$; $\varepsilon_1 = 0,8$; $r_{21} = 2082000 \text{ Дж/кг}$; $W_{P1} = 8\%$; $\alpha_1 = 2,01 \text{ Дж/м}^2\cdot\text{ч}$; - для волокна: $u_{20} = 15^0 \text{C}$; $\lambda_2 = 0,07 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $c_2 = 1600 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $\rho_2 = 12 \text{ кг/м}^3$; $R_2 = 0,025 \text{ м}$; $k_2 = 0,0003 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $W_{H2} = 9\%$; $\varepsilon_2 = 0,8$; $W_{P2} = 0\%$; $\alpha_2 = 2,5 \text{ Дж/м}^2\cdot\text{ч}$; $R = 0,1 \text{ м}$.

Таблица 1

**Изменения температуры относительно радиуса комка
хлопка-сырца и время сушки**

R, м		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
τ , сек	Температурное поле компонентов хлопка-сырца (^0C)							
	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
60	U_1	28,410	27,979	22,585	19,264	17,257	16,032	15,262
	U_2	48,185	46,651	37,922	31,277	26,143	22,218	19,261
120	U_1	34,147	33,403	27,304	22,999	19,997	17,939	16,532
	U_2	56,898	54,259	45,507	38,577	32,876	28,144	24,228

180	U_1	38,360	37,250	30,884	26,086	22,521	19,893	17,98
	U_2	61,947	58,486	49,815	42,891	37,082	32,127	27,883
240	U_1	41,784	40,312	33,733	28,720	24,811	21,789	19,484
	U_2	65,324	61,215	52,612	45,738	39,920	34,897	30,524
300	U_1	44,703	42,88	36,192	31,02	26,089	23,086	20,981
	U_2	67,744	63,109	54,551	47,728	41,929	36,887	32,46
360	U_1	47,262	45,099	38,336	33,060	28,773	25,272	22,436
	U_2	69,549	64,478	55,947	49,165	43,389	38,348	33,897

Таблица 2

Изменения температуры относительно времени сушки

τ , сек	15	30	45	60	75	90	105	120	135
$u_1(\tau, r)$	12,733	15,369	17,724	19,858	21,814	23,625	25,313	26,896	28,389
$u_2(\tau, r)$	27,759	36,037	42,095	46,864	50,777	54,074	56,905	59,371	61,543
τ , сек	150	165	180	195	210	225	240	255	270
$u_1(\tau, r)$	29,804	31,148	32,430	33,656	34,831	35,960	37,046	38,093	39,104
$u_2(\tau, r)$	63,473	65,200	66,756	68,163	69,444	70,612	71,682	72,665	73,570
τ , сек	285	300	315	330	345	360			
$u_1(\tau, r)$	40,081	41,027	41,943	42,831	43,695	44,533			
$u_2(\tau, r)$	74,406	75,179	75,896	76,560	77,179	77,547			

В таблице 3 приведены результаты расчета относительно радиуса комка хлопка-сырца при температуре воздуха 100⁰С, начальной температурой 15⁰С и влажности $W_{H1}=19\%$, $W_{H2}=9\%$ семян и волокна соответственно. Время сушки 360 секунд.

Таблица 3

Изменения температуры относительно радиуса комка

R , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$u_1(\tau, r)$	47,262	45,099	38,336	33,060	28,773	25,272	22,436
$u_2(\tau, r)$	69,549	64,478	55,947	49,165	43,389	38,348	33,897

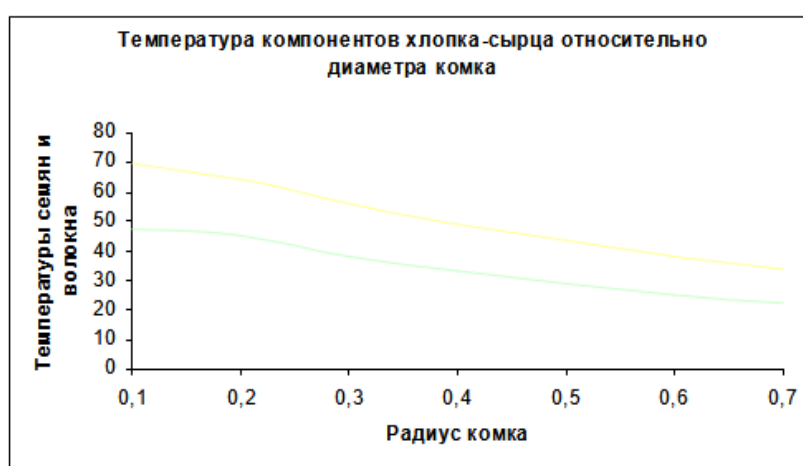


Рис.1. Зависимость температуры нагрева волокна и семян от радиуса комка хлопка-сырца

Результаты и обсуждения: Анализ результатов таблицы 3 показывает, что диаметр комка существенно влияет на интенсивность процесса сушки, т.е. с увеличением диаметра комка резко снижается темп нагрева семян и волокна. Перепад температуры внутри семян по

радиусу комка и перепад температуры между волокнами и семян, находящимся на одинаковых расстояниях от поверхности комка очень большой, что приводит к неравномерной сушке компонентов хлопка-сырца. Для повышения темпа нагрева семян, и достижения равномерности сушки необходимо период организовать сушку хлопка-сырца в разрыхленном виде, т.е. по возможности уменьшить диаметр комка.

Ниже приведены экспериментальные и расчетные данные изменения температуры компонентов хлопка-сырца.

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные данные изменения температуры компонентов хлопка-сырца

Диаметр комка R=0,7 м, температура воздуха 130 ⁰ С, начальная влажность 17,4%; время сушки 360 сек.				
Время сушки (сек.)	Температура семян		Температура волокна	
	экспериментальные	расчетные	экспериментальные	расчетные
0	10,0	10,0	10,0	10,0
15	26,0	29,0	37,0	39,5
30	34,0	35,2	42,0	40,0
45	46,0	45,7	45,0	49,0
60	52,0	53,1	60,0	54,0
90	64,0	63,4	90,0	72,0

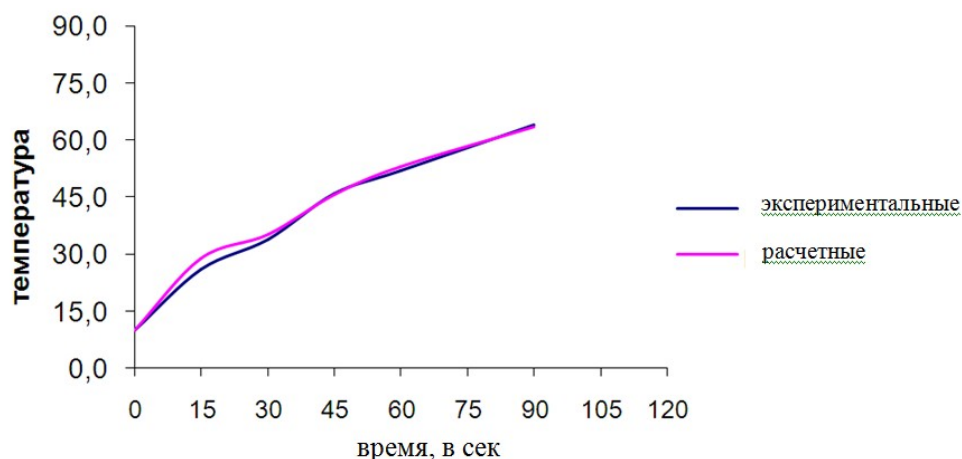


Рис.2. Изменение температуры семени

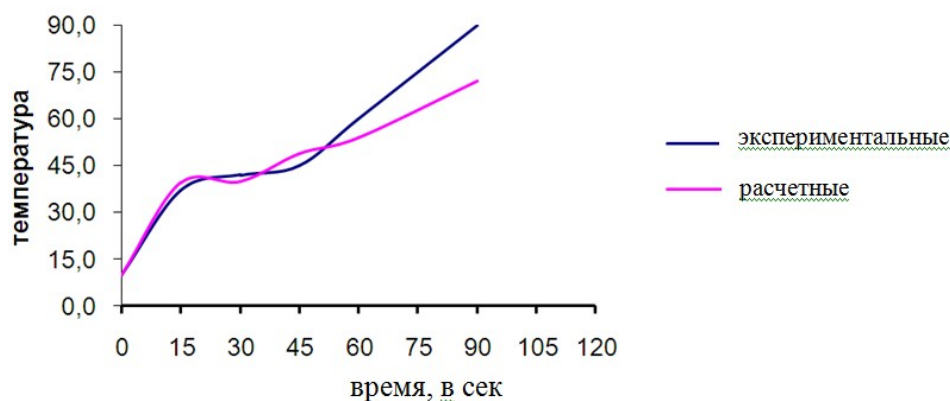


Рис.3. Изменение температуры волокна

Сравнительный анализ (рис.2 и рис.3) показывает, что погрешность расчетных и экспериментальных данных составляет не более 3-4%, что даёт возможность анализировать темп нагрева волокна и семян в виде комка хлопка-сырца.

Заключение: Получены закономерности распространения тепла между волокнами и семенами при различных диаметрах комка хлопка-сырца, температуры сушильного агента и влажности хлопка-сырца в зависимости от интенсивности процесса сушки. Полученные результаты можно будут использовать при выборе оптимальных режимов сушки хлопка-сырца с целью максимального сохранения качества вследствие равномерности нагрева их компонентов.

Литература

1. Каюмов А.Х. Effect of drying regime on moisture of components of cotton. AIP Conference Proceedings 2789, 030010 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0145748>
2. Parpiev A.P., Kayumov A.H., Pardayev H. Effect of temperature of steady heating components of cotton-seed at drying process, European science review, «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. №7-8, 2016, P.205-207.
3. Parpiyev A.P., Kayumov A.H., Axmatov N. Definition of area of soft temperature drying condition // European science review, -Vienna. №7-8, 2016, P.208-211.
4. Парпиев А.П., Каюмов А.Х., Пахтани куришти технологияси ва техникасини такомиллаштириш бўйича тадқиқотлар тахлили, ФарПИ илмий - техника журнали. – Фарғона., 2016. №4. –Б. 38-44.
5. Парпиев А.П., Каюмов А.Х., Пахтани куришти жараёнида қўлланиладиган температуранинг тахлилий шарҳи, ФарПИ илмий-техника журнали, Фарғона, №1, 2017.
6. Abdul-malik Kayumov, Gulomjon Rakhmatov. Analysis of process intensity and quality indicators of cotton drying using infrared radiation. AIP Conf. Proc. 3045, 030030 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0197620>
7. Лыков А.В. Тепломассообмен. М // "Энергия", 1978 г.
8. Щеколдин М.Н. Тепло влажностные состояние хлопка-сырца // М.:1958 с.