

УДК 66.047.37

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ВЛАЖНЫХ ТОНКИХ ПЛОСКИХ МАТЕРИАЛОВ

канд. техн. наук, доц. А.И. ОЛЬШАНСКИЙ, канд. техн. наук, проф. В.И. ОЛЬШАНСКИЙ
(Витебский государственный технологический университет)

Проведено экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских материалов в периоде падающей скорости сушки. На основании анализа и обработки многих экспериментальных данных по сушке различных материалов получены приближенные зависимости для расчета важнейших кинетических характеристик процесса сушки. Предлагаемый метод расчета влагообмена в процессе сушки основан на наиболее общих закономерностях процесса сушки и обобщенных устойчивых переменных: обобщенном времени сушки, относительной плотности теплового потока, критерию Ребиндера. Данный метод расчета кинетики сушки позволяет свести расчет теплообмена к расчету влагообмена и избежать определения коэффициентов теплообмена во втором периоде. Для проверки точности предлагаемого метода расчета времени сушки и средней температуры материала проведено сопоставление опытных и расчетных значений по полученным уравнениям, которое показало достаточное надежное совпадение экспериментальных и расчетных значений, исследуемых параметров процесса сушки. При использовании данного метода отпадает необходимость в построении кривой скорости сушки, в нахождении приведенного критического влагосодержания и относительных коэффициентах сушки.

В практике сушки широко используются эмпирические зависимости и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки, основанные на экспериментальных исследованиях. При создании приближенных методов расчета влагообмена наиболее прогрессивными являются такие методы и способы обработки опытных данных, которые основаны на наиболее общих закономерностях процесса сушки.

Анализ многих экспериментальных данных по сушке различных материалов разными методами энергоподвода позволил ввести в практику сушки переменные, которые являются устойчивым комплексом величин, характерных для процесса сушки. К таким устойчивым переменным относятся обобщенное время ($N \cdot \tau$), относительная продолжительность сушки ($\tau^* = \tau_{II} / \tau_I$), относительная скорость сушки ($N^* = \frac{1}{N} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}$), относительная плотность теплового потока ($q^* = q_{II} / q_I$). Здесь N – скорость сушки в первом периоде, с; τ_I, τ_{II} – время сушки в первом и втором периодах соответственно, с; $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ – скорость сушки в периоде падающей скорости, с⁻¹; q_I, q_{II} – плотности теплового потока в первом и втором периодах, Вт/м².

Постановка задачи. Вывод расчетных уравнений

Для периода падающей скорости сушки на основании анализа и обработки многих экспериментальных данных по сушке различных материалов А.В. Лыковым в работе [1] установлена взаимосвязь между критериями Нуссельта (Nu) в первом и втором периодах сушки и критерием Ребиндера (Rb) на основе важнейших кинетических характеристик и, таким образом, расчет теплообмена сведен к расчету влагообмена. Если обозначить

$$\Delta T^* = \frac{T_c - T_n}{T_c - T_m} = \frac{T_c - T_n}{T_c - T_o}; \text{ и } N^* = \frac{d\bar{u}/d\tau}{N} = \frac{Nu}{Nu_{kp}} = \frac{\alpha}{\alpha_{kp}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{kp}} \right)^n,$$

то можно записать следующие выражения, устанавливающие взаимосвязь между важнейшими обобщающими характеристиками процесса сушки [1]:

$$\Delta T^* = N^* \cdot (1 + Rb) \cdot \frac{\bar{\alpha}_{kp}}{\bar{\alpha}} = N^* \cdot (1 + Rb) \cdot \frac{Nu_{kp}}{Nu}, \quad (1)$$

где $\bar{\alpha}_{kp}, \bar{\alpha}$ – коэффициенты теплообмена в первом и втором периодах, Вт/м²·град; Nu_{kp}, Nu – критерий Нуссельта в первом и втором периодах; Rb – число Ребиндера.

Числа Ребиндера Rb для большинства влажных материалов в конце процесса сушки при влагосодержаниях $\bar{u} \rightarrow \bar{u}_p$ принимают значения $Rb \approx 0,1 - 0,25$ [1]. Пренебрегая малыми значениями числа Rb , можно написать

$$\Delta T^* = N^* \cdot \frac{\bar{\alpha}_{kp}}{\bar{\alpha}} = N^* \cdot \left(\frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u}} \right)^n = N^* \cdot \frac{Nu_{kp}}{Nu}. \quad (2)$$

Обработка и анализ опытных данных позволили установить связь [1] $\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = f(N^*)$ в виде уравнений:

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n = N^{*0,57}; \quad (3)$$

$$\Delta T^* = \frac{T_c - T_n}{T_c - T_0} = N^{*0,43}, \quad (4)$$

где T_c, T_n, T_0 – температура среды, поверхности материала, среднеинтегральная температура в первом периоде сушки, °С.

В работах [2 – 4] установлено, что относительная скорость сушки N^* изменяется от влагосодержания \bar{u} по экспоненциальному закону.

Эту зависимость $N^* = f(\bar{u})$ можно представить выражениями:

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp(-a \cdot N \cdot \tau); \quad (5)$$

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp(-m \cdot \tau^*). \quad (6)$$

Константы a и m по физическому смыслу аналогичны коэффициенту сушки (K) и вычисляются по уравнениям [2, 5].

$$\alpha = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{\bar{u}_{кр}}, \quad m = 0,67 \cdot \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}} - 0,35, \quad (7)$$

где \bar{u}_0 – начальное влагосодержание материала.

С учетом критерия Ребиндера соотношения (3) и (4) примут вид:

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n = N^{*0,57} \cdot (1 + Rb); \quad (8)$$

$$\Delta T^* = \frac{T_c - T_n}{T_c - T_0} = N^{*0,43} \cdot (1 + Rb). \quad (9)$$

На основании уравнений (2) и (3) имеем

$$\Delta T^* \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{кр}} = \Delta T^* \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n = N^* \cdot (1 + Rb). \quad (10)$$

Подставляем соотношения (5) и (6) в уравнение (3), получим

$$\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{n/0,57} = \exp(-a \cdot N \cdot \tau); \quad (11)$$

$$\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{n/0,57} = \exp(-m \cdot \tau^*). \quad (12)$$

Тогда можно записать

$$\exp(a \cdot N \cdot \tau) = \left(\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}} \right)^{n/0,57}; \quad (13)$$

$$\exp(m \cdot \tau^*) = \left(\frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u}} \right)^{n/0,57}, \quad (14)$$

или

$$a \cdot N \cdot \tau = \frac{n}{0,57} \cdot \ln \frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u}}; \quad (15)$$

$$m \cdot \frac{\tau_{II}}{\tau_I} = \frac{n}{0,57} \cdot \ln \frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u}}. \quad (16)$$

С учетом равновесного влагосодержания u_p и времени сушки в первом периоде $\tau_I = \bar{u}_0 - \bar{u}_{kp} / N$ длительность процесса сушки до заданного значения влагосодержания определяется по уравнениям:

$$\tau = \frac{1}{N \cdot 10^2} \cdot \left(10^2 (\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp}) + \frac{n}{0,57 \cdot a} \cdot \ln \frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u} - u_p} \right); \quad (17)$$

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp}}{N} \cdot \left(1 + \frac{n}{0,57 \cdot m} \cdot \ln \frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u} - u_p} \right), \quad (18)$$

где \bar{u} – текущее влагосодержание материала. В уравнении (17) учтено отношение $\bar{u} = 0,01W$ и, следовательно, $N, \frac{1}{\text{мин}} = N \cdot 100 \text{ \%}/\text{мин}$. Если необходимо учитывать влияние критерия Ребиндера, продолжительность сушки определяется уравнениями:

$$\tau = \frac{1}{N \cdot 10^2} \cdot \left(10^2 (u_0 - \bar{u}_{kp}) + \frac{m}{0,57 \cdot a} \cdot \ln \frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u} - u_p} \right) \cdot (1 + Rb); \quad (19)$$

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp}}{N} \cdot \left(1 + \frac{n}{0,57 \cdot m} \cdot \ln \frac{\bar{u}_{kp}}{\bar{u} - u_p} \right) \cdot (1 + Rb). \quad (20)$$

Обработка экспериментальных данных

Значения констант a и m вычисляются по зависимостям (7), число Ребиндера определяется по эмпирической формуле [4, 6]:

$$Rb = A \cdot \exp(-n_0(\bar{u} - u_p)). \quad (21)$$

Значения постоянных A и n_0 для некоторых материалов даны в таблице 1.

Таблица 1

Постоянные A и n_0 в формуле (21) для некоторых влажных материалов

Материал	δ , мм	Режим сушки			A	n_0
		t_c , °C	g , м/с	φ , %		
Пористая керамика	5...6	90...150	3...10	5	0,5	20
Асбест листовой	6...12	90...150	3...10	5	0,5	15
Кожа подошвенная	4...5	40...60	3...5	15	0,5	8,5
Войлок шерстяной	8...18	90...120	3...10	5	0,1	6
Картон	4...5	90...150	3...10	5	0,025	-3,5
Фетр	4	50	0,5...1	25...75	0,1	10

Анализ целого ряда температурных кривых $\bar{t} = f(\tau)$, построенных для локальных температур на поверхности t_n , в центре t_c и среднеинтегральных температур t_0 при конвективной сушке тонких плоских материалов при различных режимах, показал, что температура на поверхности материала t_n в первом периоде выше среднеобъемной t_0 на 2...3 °C и отличается от температуры мокрого термометра t_m всего на 1,5...2 °C.

Температура t_m для первого периода вычисляется по уравнению [6]:

$$t_m = t_c - \frac{q_1}{\bar{\alpha}_{кр}} = t_c - \frac{r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N}{\bar{\alpha}_{кр}}, \quad (22)$$

где r – теплота парообразования, кДж/кг; ρ_0 – плотность абсолютно сухого тела, кг/м³; R_v – отношение объема тела к поверхности, м.

Для расчета коэффициентов теплообмена $\bar{\alpha}_{кр}$ и $\bar{\alpha}$ использовалась формула [1]:

$$Nu = C \cdot Re^{p_0} \cdot \left(\frac{T_c}{T_m} \right)^{m_0} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n. \quad (23)$$

Значения параметров в формуле (23) для некоторых материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения параметров материалов в формуле (23)

Материал	C	p_0	m_0	n
Войлок	0,435	0,5	2	0,5
Листовой асбест	0,75	0,5	2	0,5
Подошвенная кожа	0,8	0,5	2	0,25
Пористая керамика	0,75	0,5	2	0,5

На рисунке 1 представлены результаты обработки опытных данных по конвективной сушке влажных материалов в широком диапазоне изменения режимов сушки. Эта линейная зависимость $\bar{t}_0 = f(t_c)$ оказалась общей для целой группы материалов и описывается уравнением:

$$\bar{t}_0 = 0,29t_c + 10. \quad (24)$$

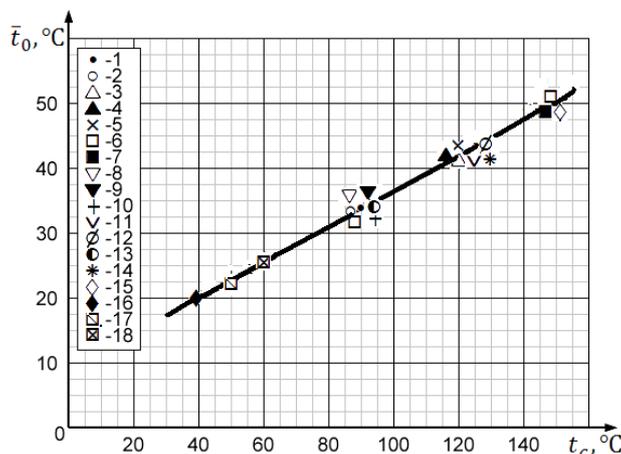


Рис. 1. Зависимость среднеобъемной температуры влажного материала

в первом периоде t_0 от температуры среды для различных влажных материалов при режимах сушки:

- I. Пористая керамика: 1– $t_c = 90$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; 2– $\vartheta = 5$ м/с; 3– $t_c = 120$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; 4– $\vartheta = 5$ м/с; 5– $\vartheta = 10$ м/с; 6– $t_c = 150$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; 7– $\vartheta = 5$ м/с; $\delta = 5$ мм.
- II. Глина: 8– $t_c = 90$ °С, $\vartheta = 5$ м/с; 9– $\vartheta = 3$ м/с; 10– $\vartheta = 10$ м/с; 11– $t_c = 120$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; 12– $\vartheta = 5$ м/с; $\delta = 12$.
- III. Асбест листовой: 13– $t_c = 90$ °С, $\vartheta = 5$ м/с; 14– $t_c = 120$ °С, $\vartheta = 5$ м/с; 15– $t_c = 150$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; $\delta = 6$ мм.
- IV. Подошвенная кожа: 16– $t_c = 40$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; 17– $t_c = 50$ °С, $\vartheta = 5$ м/с; 18– $t_c = 60$ °С, $\vartheta = 3$ м/с; $\delta = 4$ мм

Из формулы (2) и (4) совместно с уравнениями (5) и (6) можно получить зависимости для определения температуры на поверхности материала в периоде падающей скорости сушки.

Выражение (2) запишем в виде:

$$\Delta T^* = \frac{\bar{\alpha}_{кр}}{\bar{\alpha}} \cdot N^* = \left(\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}} \right)^n \cdot \exp(-a \cdot N \cdot \tau); \quad (25)$$

$$\Delta T^* = \frac{\bar{\alpha}_{кр}}{\bar{\alpha}} \cdot N^* = \left(\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}} \right)^n \cdot \exp(-m \cdot \tau^*). \quad (26)$$

Из решения уравнений (25) и (26) имеем:

$$t_n = t_c - \frac{t_c - \bar{t}_0}{\exp(a \cdot N \cdot \tau_{II})} \cdot \left(\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}} \right)^n; \quad (27)$$

$$t_n = t_c - \frac{t_c - \bar{t}_0}{\exp\left(\frac{m \cdot N \cdot \tau_{II}}{u_0 - \bar{u}_{кр}}\right)} \cdot \left(\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}} \right)^n, \quad (28)$$

где τ_{II} – текущее время сушки во втором периоде, отсчитываемое от $\tau = 0$ при $\bar{u} = \bar{u}_{кр}$.

Если воспользоваться уравнением (4), то уравнения (27) и (28) примут вид:

$$t_n = t_c - \frac{t_c - \bar{t}_0}{\exp(0,43 \cdot a \cdot N \cdot \tau_{II})}; \quad (29)$$

$$t_n = t_c - \frac{t_c - \bar{t}_0}{\exp\left(\frac{0,43 \cdot m \cdot N \cdot \tau_{II}}{u_0 - \bar{u}_{кр}}\right)}. \quad (30)$$

При необходимости учета значений числа Ребиндера во все уравнения вносится поправка в виде комплекса $(1 + Rb)$. Число Ребиндера вычисляется по эмпирической формуле (21).

Анализ результатов экспериментальных исследований

Для проверки точности предлагаемых методов расчета проведено сопоставление опытных и расчетных значений времени сушки и температуры материала по уравнениям (17), (18) и (27) – (30).

На рисунке 2 и рисунке 3 представлено сравнение опытных и расчетных значений времени сушки и температуры материала для различных влажных материалов.

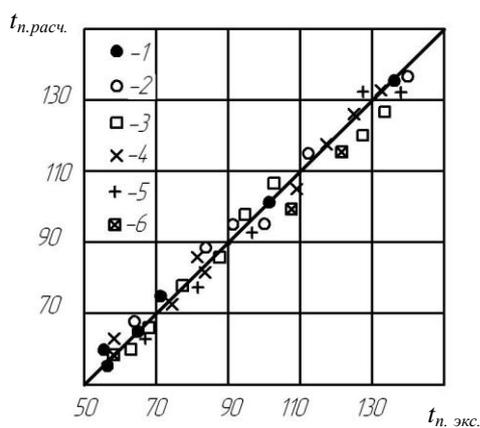


Рис. 2. Сравнение опытных и расчетных значений температуры материала при сушке пористой керамики и листового асбеста.

Пористая керамика: 1 – по формуле (27);

2 – по формуле (28); 3 – по формуле (29).

Листовой асбест: 4 – по формуле (27);

5 – по формуле (28); 6 – по формуле (30)

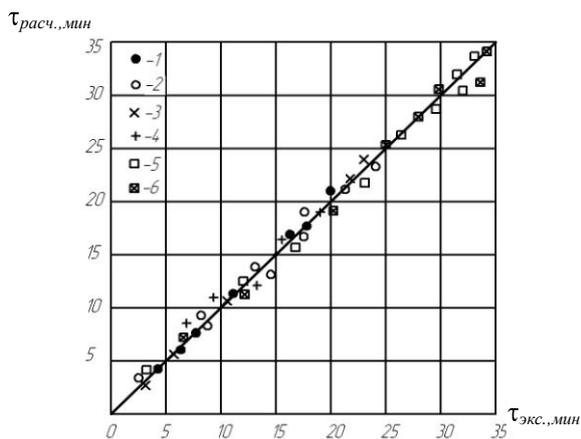


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных значений времени сушки для пористой керамики, листового асбеста и подошвенной кожи.

Пористая керамика: 1 – по формуле (17); 2 – по формуле (18).

Листовой асбест: 3 – по формуле (17); 4 – по формуле (18).

Подошвенная кожа: 5 – по формуле (17);

6 – по формуле (18)

Из рисунков видно, что разброс расчетных точек от опытной прямой находится в пределах точности эксперимента.

Выводы. При использовании данного метода расчета кинетики сушки отпадает необходимость в построении кривой скорости сушки, в определении приведенного критического влагосодержания, относительных коэффициентов сушки x . Необходимо знать только скорость сушки в первом периоде N и критическое влагосодержание материала $\bar{u}_{кр}$, которое практически незначительно зависит от режимных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А.В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А.В. Лыков, П.С. Куц, А.И. Ольшанский // ИФЖ. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401 – 406.
2. Ольшанский, А.И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А.И. Ольшанский, П.С. Куц // Изв. вузов. Пищевая промышленность. – 1977. – № 5. – С. 97 – 101.
3. Куц, П.С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки влажных материалов / П.С. Куц, А.И. Ольшанский // ИФЖ. – 1977. – Т. 32, № 6. – С. 1007 – 1014.
4. Ольшанский, А.И. Некоторые закономерности кинетики сушки влажных материалов / А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский, Е.Ф. Макаренко // ИФЖ. – 2007. – Т. 80, № 4. – С. 143 – 146.
5. Ольшанский, А.И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А.И. Ольшанский, Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский // ИФЖ. – 2008. – Т. 81, № 6. – С. 1102 – 1110.
6. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: «Энергия», 1968.

Поступила 09.04.2010

STUDY OF THE KINETICS OF THE DRYING HUMID FINE FLAT MATERIALS

A. OLISHANSKI, V. OLISHANSKI

The brought results of the experimental study of the kinetics of the process of the drying fine flat humid material at period decreasing velocities of the drying. They are received drawn near dependencies for calculation spread of time and average volume of the temperature in process of the drying. The proposed method of the calculation heat of the humid exchange process of the drying is founded on most general regularity of the kinetics of the drying and with sufficient accuracy describes the mode of the drying in second period, with minimum amount of the constants, defined from experience.