

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА

А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский

В практике сушки материалов и изделий легкой и текстильной промышленности широко используются эмпирические зависимости и приближенные методы расчета кинетики сушки, основанные на экспериментальных исследованиях. Под кинетикой процесса сушки понимают изменение среднеинтегральных влагосодержаний и средней температуры влажного тела с течением времени. Кинетика сушки определяет основные закономерности протекания процесса сушки при взаимодействии влажного тела с окружающей средой, позволяет рассчитать количество испаренной влаги, продолжительность процесса, температуру материала, расход тепла на сушку [1].

Из теории и практики сушки известно, что интенсивность испарения и среднеобъемная температура тела в периоде убывающей скорости сушки изменяются по экспоненциальному закону. К подобным задачам относятся задачи на нагревание влажных тел в среде с постоянной температурой, когда испарение происходит с поверхности материала, которые можно отнести к регулярному тепловому режиму Г.М.Кондратьева [2,3].

В качестве общего свойства регулярного теплового режима для процессов сушки (нагрев влажных тел) можно записать [2,3]

$$-\frac{d\bar{t}}{(t_c - \bar{t})d\tau} = m_t = \text{const}, \quad (1)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{(\bar{u} - u_p)d\tau} = m_u = \text{const}, \quad (2)$$

где $\bar{t}$ и $\bar{u}$ – средние по объему текущие значения температуры и влагосодержания тела; m_t и m_u – темп нагревания и темп убыли влагосодержания тела в периоде падающей скорости сушки.

Следовательно, скорость нагревания влажного тела $\frac{d\bar{t}}{d\tau}$ и скорость убыли влагосодержания $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ по условиям регулярного режима выражаются уравнениями

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m_t(t_c - \bar{t}), \quad (3)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = m_u(\bar{u} - u_p). \quad (4)$$

Скорости изменения средней температуры и среднего влагосодержания в стадии регулярного режима являются величинами постоянными. Постоянная m_u в уравнении (4) имеет физический смысл коэффициента сушки $K(c^{-1})$.

Постоянные m_t и m_u в уравнениях (3) и (4) определяются экспериментально построением графических зависимостей между $\ln(t_c - \bar{t})$ и $\ln(\bar{u} - u_p)$ от времени τ в стадии регулярного режима, который наступает в периоде падающей скорости сушки. Тангенс угла наклона прямых равен

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_0) - \ln(t_c - \bar{t})}{\tau - \tau_0} = m_t = \text{const}; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\ln(\bar{u}_{\text{кр}} - u_p) - \ln(\bar{u} - u_p)}{\tau - \tau_0} = m_u = \text{const}. \quad (6)$$

Отсчет времени сушки для периода убывающей скорости ведется от нуля, т.е. при $\tau = 0$; $\bar{t} = \bar{t}_0$; $\bar{t}_0$ – значение среднеобъемной температуры в первом периоде; $\bar{t}$ – текущее значение среднеинтегральной температуры, соответствующее текущему времени τ .

Обработка опытных данных по сушке ряда влажных обувных и текстильных материалов при конвективном способе подвода тепла показала линейную зависимость средней температуры $\bar{t}_0$ влажного тела в первом периоде от температуры среды t_c , которая выражается единым для всех материалов соотношением

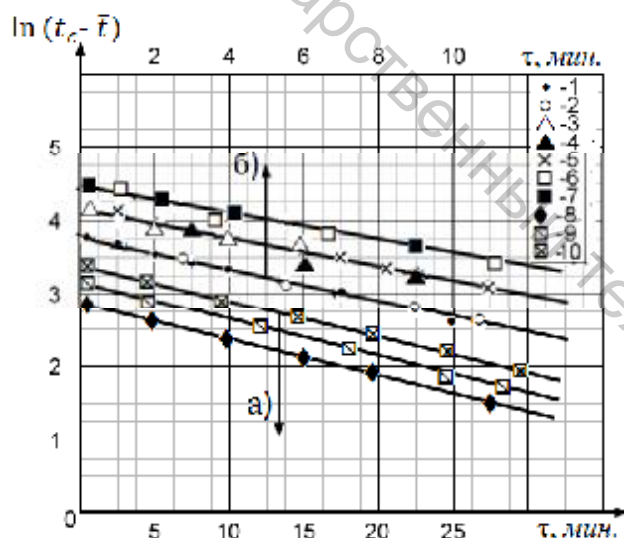


Рисунок 1 – Зависимость $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ для подошвенной кожи (а) и пористой керамики (б) при конвективной сушке при различных режимах сушки. Пористая керамика: 1 - $t_c = 90^\circ\text{C}$, $\vartheta = 3$ м/с; 2 - $\vartheta = 5$ м/с; 3 - $t_c = 120^\circ\text{C}$; $\vartheta = 3$ м/с; 4 - $\vartheta = 5$ м/с; 5 - $\vartheta = 10$ м/с; 6 - $t_c = 150^\circ\text{C}$; $\vartheta = 3$ м/с; 7 - $\vartheta = 5$ м/с. Подошвенная кожа: 8 - $t_c = 40^\circ\text{C}$; $\vartheta = 3$ м/с; 9 - $t_c = 50^\circ\text{C}$; $\vartheta = 5$ м/с; 10 - $t_c = 60^\circ\text{C}$; $\vartheta = 3$ м/с

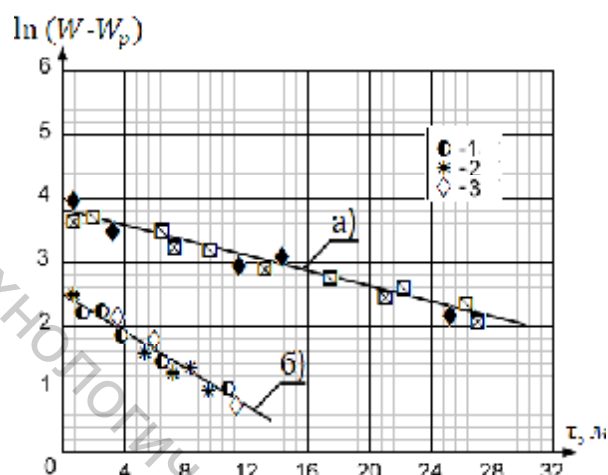


Рисунок 2 – Зависимость $\ln(\bar{u} - u_p) = f(\tau)$ для подошвенной кожи (а) и листового асбеста (б) при конвективной сушке для различных режимов сушки. Подошвенная кожа: обозначения даны на рис.1 (а). Листовой асбест: 1 - $t_c = 90^\circ\text{C}$; $\vartheta = 5$ м/с; 2 - $t_c = 120^\circ\text{C}$; $\vartheta = 5$ м/с; 3 - $t_c = 150^\circ\text{C}$; $\vartheta = 3$ м/с

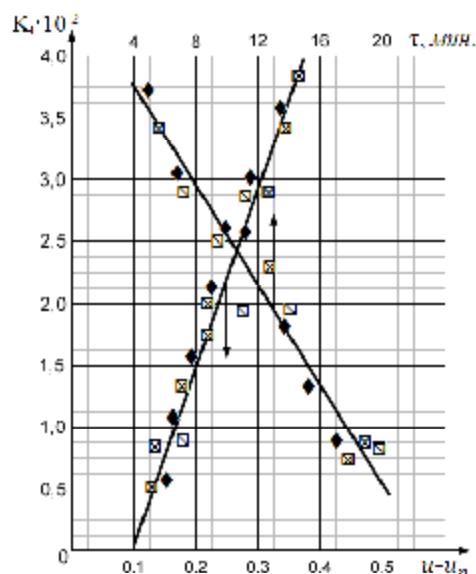


Рисунок 3 – Зависимость безразмерного параметра $K_t = f_1(\bar{u} - u_p)$ и $K_t = f_2(\tau_{II})$ для подошвенной кожи при конвективной сушке в условиях вынужденной конвекции при различных режимах. Обозначения приведены на рис.1 (а)

$$\bar{t}_0 = 10 + 0,28t_c. \quad (7)$$

Постоянные m_t и m_u есть скорости изменения логарифмов разностей температур и влагосодержаний по времени, т.е.

$$\frac{\partial [\ln(t_c - \bar{t})]}{\partial \tau} = m_t; \quad (8)$$

$$\frac{\partial [\ln(\bar{u}_{кр} - \bar{u})]}{\partial \tau} = m_u, \quad (9)$$

и являются одинаковыми для всех точек тела для среднеобъемной температуры $\bar{t}$ и среднего влагосодержания $\bar{u}$.

Обработка экспериментов методом регулярного режима по соотношениям (5) и (6) представлена на рис.1 и рис.2, на которых даны зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ для пористой керамики и подошвенной кожи (рис.1) и $\ln(\bar{u} - u_p) = f(\tau)$ для листового асбеста и подошвенной кожи (рис.2) при конвективной сушке в условиях вынужденной конвекции в широком интервале изменения режимных параметров, а в таблице 1 приведены значения постоянных m_t и m_u для некоторых материалов.

Таблица 1 – Значения постоянных m_t и m_u для некоторых влажных материалов

Наименование материала	Режим сушки			$m_t, \text{мин}^{-1}$	$m_u, \text{мин}^{-1}$
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$v^3, \text{м/с}$	φ		
Пористая керамика, $\delta = 5 \text{ мм}$	90-150	3-10	5	0,1	0,135
Подошвенная кожа, $\delta = 4 \text{ мм}$	40-60	3-5	15	0,04	0,055
Листовой асбест, $\delta = 6 \text{ мм}$	90-150	3-10	5	0,06	0,15
Глина, $\delta = 10 - 12 \text{ мм}$	90-150	3-10	5	0,07	0,11
Войлок, $\delta = 12 \text{ мм}$	90-150	3-10	5	0,02	0,08

Из выражений (5), (6) и (8), (9) определяется время сушки во втором периоде, отсчитываемое от $\tau = 0$ до заданных значений средней температуры и среднего влагосодержания материала

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_t} \cdot \ln \left(\frac{t_c - \bar{t}_0}{t_c - \bar{t}} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_u} \cdot \ln \left(\frac{\bar{u}_{кр} - u_p}{\bar{u} - u_p} \right) \quad (11)$$

Решая уравнения (10) и (11) относительно среднеобъемной температуры материала $\bar{t}$ и среднего влагосодержания $\bar{u}$ получим для периода падающей скорости сушки уравнения для определения средней температуры и длительности процесса сушки

$$\bar{t} = t_c - \frac{t_c - \bar{t}_0}{\exp(m_t \tau_{II})}; \quad (12)$$

где τ_{II} – текущее время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля, соответствующее текущему значению среднеинтегральной температуры $\bar{t}_0$.

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} + \frac{1}{m_u} \ln \left(\frac{\bar{u}_{кр} - u_p}{\bar{u} - u_p} \right) \quad (13)$$

где $\frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} = \tau_I$ – время сушки в первом периоде; $\bar{u}_0, u_{кр}, u_p$ – начальное, критическое и равновесное влагосодержание материала; N – скорость сушки в первом периоде.

Анализ экспериментов по нагреванию влажных тел методом регулярного режима позволяет ввести в расчеты по кинетике сушки безразмерный параметр K_t .

$$K_t = \frac{c_{вл} \frac{d\bar{t}}{d\tau}}{rm_t} = \frac{c_{вл} b_t}{rm_t}; \quad (14)$$

где $\frac{d\bar{t}}{d\tau} = b_t$ – температурный коэффициент; r – теплота парообразования; $c_{вл}$ – теплоемкость влажного тела. На рис.3 представлены зависимости безразмерного параметра $K_t = f_1(\bar{u} - u_p)$ и $K_t = f_2(\tau_{II})$ для подошвенной кожи при сушке в условиях вынужденной конвекции из которых видно, что зависимости эти линейные.

Зависимость $K_t = f(\bar{u} - u_p)$ описывается уравнением при $\bar{u} \leq \bar{u}_{кр}$

$$K_t = 0,15(\bar{u} - u_p) - 0,015. \quad (15)$$

Основное уравнение кинетики сушки А.В.Лыкова [1] для безразмерного потока тепла

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^*(1 + Rb), \quad (16)$$

где критерий Ребинбера $Rb = \frac{c_{вл} \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}}{r} = \frac{c_{вл} b}{r}$; $b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}$ – температурный коэффициент сушки; q_I, q_{II} – плотности теплового потока в первом и втором периодах.

Рассмотрим отношение

$$\frac{K_t}{Rb} = \frac{c_{вл} \frac{d\bar{t}}{d\tau}}{rm_t} : \frac{c_{вл} \frac{d\bar{t}}{d\tau}}{r} = \frac{1}{m_t} \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (17)$$

где $\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = NN^*$ [4,5]; N^* – относительно скорость сушки.

Тогда для критерия Ребинбера можно записать

$$Rb = \frac{K_t m_t}{NN^*}. \quad (18)$$

Основное уравнение кинетики сушки (16) можно представить в виде

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^* + \frac{K_t m_t}{N}. \quad (19)$$

или

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^* + \left(1 + \frac{K_t m_t}{NN^*} \right) \quad (20)$$

Относительная скорость сушки N^* вычисляется по уравнениям [4]

$$N^* = \exp(-m\tau^*), \text{ или } N^* = \exp(-aN\tau); \quad (21)$$

где постоянные m и a определяются по эмпирическим зависимостям [4]

$$m = 0,67 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}} - 0,35; \quad (22)$$

$$a = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{\bar{u}_{кр}}. \quad (23)$$

При этом надо иметь ввиду соотношение $\bar{u} = 0,01W$; где W – влагосодержание материала, %.

Следовательно, чтобы воспользоваться основным уравнением кинетики сушки (16) для расчета плотности теплового потока во втором периоде необходимо знать параметр N – скорость сушки в первом периоде и критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$, которое для многих тонких плоских материалов незначительно меняется при изменении режимных параметров сушки [1,4,5].

В таблице 2 приведено сравнение расчетных параметров процесса сушки для подошвенной кожи при различных режимах с экспериментом по формулам (12), (13), (16), (19), (24). Расчетная плотность теплового потока определялась по отношению

$$q_{расч}^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}(t_c - t_{II})}{r\rho R_v N}; \quad (24)$$

где $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена во втором периоде сушки; t_{II} – температура поверхности материала; ρ – плотность; R_v – отношение объема тела к поверхности.

Таблица 2 – Сравнение расчетных параметров процесса конвективной сушки подошвенной кожи при различных режимах по формулам (12), (13), (16), (19) и (24) с экспериментом

1. Режим сушки: $t_c=40^\circ\text{C}$; $v=3$ м/с; $\bar{u}_0 = 0,86$; $\bar{u}_{кр} = 0,56$							
$\bar{u} - u_p$	$q^*_{экс} (16)$	$q^*_{экс} (19)$	$q^*_{расч} (24)$	$\bar{t}_{экс} ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{расч} ^\circ\text{C} (12)$	$\tau_{экс}$ МИН	$\tau_{расч}$ МИН (13)
0,45	0,81	0,84	0,83	23,5	25	18	17,6
0,36	0,68	0,63	0,67	32,5	33	25	25,5
0,24	0,15	0,22	0,19	37	36	39	39
2. Режим сушки: $t_c=50^\circ\text{C}$; $v=3$ м/с; $\bar{u}_0 = 0,86$; $\bar{u}_{кр} = 0,57$							
0,45	0,68	0,7	0,69	28,5	29,5	17	16,5
0,36	0,53	0,56	0,57	35	36	24	24,5
0,24	0,32	0,33	0,31	41	41,5	36,5	38
3. Режим сушки: $t_c=50^\circ\text{C}$; $v=3$ м/с; $\bar{u}_0 = 0,86$; $\bar{u}_{кр} = 0,57$							
0,45	0,65	0,67	0,68	32,5	34	16	15,2
0,36	0,56	0,52	0,55	37,5	39	21	21,4
0,24	0,31	0,29	0,3	43	42	35,5	36,4

ВЫВОДЫ

Исследование тепловлагообмена методом регулярного режима позволяет разработать методику расчета кинетики процесса сушки, при использовании которой необходимо знать только скорость сушки в первом периоде N и первое критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$. Используя эмпирические зависимости, полученные на основе многочисленных экспериментальных данных, можно рассчитать основные характеристики процесса сушки.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков . – М.: Энергия, 1973. – 350 с.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков . – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Лыков, А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков . – М.: Энергия, 1971. – 651 с.
4. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А. И. Ольшанский, Е. Ф. Макаренко, В. И. Ольшанский . – Минск : Инженерно-физический журнал. Т. – 81 . – № 6 . – 2008. – с. 1102-1110.
5. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 485 с.

Статья поступила в редакцию 03.02.2010 г.

SUMMARY

The investigation of heat exchange of G.M. Kondratjew's regular method is conducted. The analyses and processing of experimental data using the regular regime method allowed to develop the methods for kinetics calculations of drying process with the minimal amount of constants defined experimentally.