

УДК 66.047.37

ТЕМПЕРАТУРА ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ТОНКИХ ПЛОСКИХ МАТЕРИАЛОВ

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

Представлено экспериментальное исследование теплообмена для периода падающей скорости сушки, проведенное на основе аналитического решения задачи А.В. Лыкова на нагревание влажного тела в среде с постоянной температурой. В результате обработки экспериментальных данных с использованием результатов аналитического решения задачи разработан метод определения температуры влажного материала в периоде убывающей скорости сушки. Предлагаемый метод расчета температуры влажного материала является универсальным для тонких плоских влажных тел.

Введение. Сушка влажных материалов является процессом теплотехнологическим, в котором при сушке изменяются технологические свойства материала.

Оптимальный режим сушки, в котором температура теплоносителя играет основную роль, должен соответствовать наилучшим технологическим свойствам материала. Температура влажного материала в процессе сушки – один из основных параметров, влияющих на структурно-механические свойства влажного материала, которые определяют качество готовой продукции. Длительное воздействие повышенной температуры может вызывать коробление и растрескивание материала, потерю формы.

Нахождение температуры влажного тела в процессе сушки связано с решением дифференциального уравнения теплопереноса при граничных условиях третьего рода. Однако механизм влаготеплопереноса внутри влажного тела, связанный с внешним взаимодействием поверхности тела с окружающей средой, отличается большой сложностью. Поэтому для определения температуры материала при сушке используются эмпирические уравнения, полученные на основе эксперимента.

Постановка задачи. При исследовании теплообмена в процессе сушки тонких плоских материалов воспользуемся результатами аналитического решения дифференциального уравнения на нагревание влажной неограниченной пластины в среде с постоянной температурой среды $t_c = const$ [1] при начальных и граничных условиях третьего рода [2]:

$$t_{\tau=0} = t_{o.c.}; \quad \theta = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{o.c.}} = \exp(-\beta\tau), \quad (1)$$

или

$$\theta = \frac{t_{II} - t_{o.c.}}{t_c - t_{o.c.}} = (1 - \exp(-\beta\tau)), \quad (2)$$

где θ – относительная температура влажного материала; t_c – температура теплоносителя, °С; t_{II} – температура поверхности материала, °С; $t_{o.c.}$ – температура окружающей среды, °С; τ – время сушки, мин.

Уравнения температурных кривых при задании относительной температуры θ по соотношениям (1) и (2) принимают вид:

$$t_{II} = t_c - (t_c - t_{o.c.}) \exp(-\beta\tau); \quad (3)$$

$$t_{II} = t_{o.c.} + (t_c - t_{o.c.})(1 - \exp(-\beta\tau)). \quad (4)$$

Из аналитического решения задачи на нагревание влажного тела можно записать [1]:

$$\theta = f(\exp Fo, Pd) = f(\exp \beta\tau), \quad (5)$$

где произведение критерия Фурье Fo на критерий Предводителя Pd равно

$$Fo \cdot Pd = \frac{a\tau}{R^2} \cdot \frac{\beta R^2}{\alpha} = \beta\tau. \quad (6)$$

Здесь α – коэффициент температуропроводности влажного тела, м²/с; R – характерный размер тела, м; β – коэффициент, определяющий скорость изменения температуры поверхности материала, мин⁻¹.

Из аналитического решения задачи [1] получают также критерий, который равен отношению психометрической разности $(t_c - t_M)$ к избыточной температуре окружающей среды $(t_c - t_{o.c.})$:

$$\theta_M = \frac{t_c - t_M}{t_c - t_{o.c.}}; \quad (7)$$

$$\theta_M = \frac{rj_0}{\bar{\alpha}_{sp}(t_c - t_{o.c.})}, \quad (8)$$

где t_M – температура мокрого термометра, равная температуре поверхности материала t_{II} в периоде постоянной скорости сушки, °С; j_0 – интенсивность испарения в первом периоде, кг/м²·ч; $\bar{\alpha}_{sp}$ – коэффициент теплообмена в первом периоде Вт/м²·°С; r – теплота парообразования кДж/кг; θ_M – относительная температура в первом периоде сушки.

Теплота парообразования вычисляется по формуле:

$$r = 2500 - 2,3\bar{t}, \quad \text{кДж/кг}, \quad (9)$$

где \bar{t} – среднеинтегральная температура влажного тела, °С.

Из уравнения (7) и (8) имеем

$$t_M = t_c - \frac{rj_0}{\bar{\alpha}_{sp}}, \quad \text{°С}. \quad (10)$$

Таким образом, относительная температура θ_M приобретает значение параметрического критерия.

Экспериментальное исследование теплообмена и обработку опытных данных по сушке проведем на основе результатов аналитических решений по нагреванию влажных тел при $t_c = const$. Такой метод обработки экспериментальных данных с использованием результатов аналитических решений придает исследованию процесса сушки более обобщенный характер и сближает теорию и практику сушки.

Обработка экспериментальных данных. При определении температуры t_M для периода постоянной скорости сушки по уравнениям (7) и (10) используем экспериментальные данные по интенсивности испарения j_0 и уравнение (11) для вычисления коэффициентов теплообмена α в процессе сушки:

$$Nu = C \cdot Re^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_M} \right)^2 \cdot \left(\frac{W}{W_{кр}} \right)^m, \quad (11)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; C и n – постоянные, определяемые экспериментально; W и $W_{кр}$ – текущее и критическое влагосодержание материала.

В таблице 1 даны значения параметров C и n в уравнении (11).

Таблица 1

Значения параметров C и n в уравнении (11)

Наименование материала	C	n
Пористая керамика	0,75	0,5
Листовой асбест	0,75	0,5
Глина	0,45	0,9

Сравнение расчетных значений t_M по уравнениям (7) и (10) с экспериментом для некоторых влажных материалов представлено в таблице 2, из которой видно, что уравнение (10) дает вполне удовлетворительные совпадения с экспериментом.

Уравнения (7), (8) и (10) установлены А.В. Лыковым [1] для периода постоянной скорости сушки, для которого $t_M = const$, а критерий Предводителя Pd = 0.

Проведем исследование возможности использования результатов аналитического решения задачи для периода падающей скорости сушки.

Таблица 2

Сравнение расчетных значений температуры мокрого термометра t_M
по уравнениям (7) и (10) с экспериментом

Материал	Режим сушки		$W_{кр},$ %	$\bar{\alpha}_{кр},$ Вт/м ² ·°С	$j_0,$ кг/м ² ·ч	θ_M экс	θ_M (7)	$t_M, ^\circ\text{C}$ (10)	$t_{M1}, ^\circ\text{C}$ экс
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$U, \text{ м/с}$							
Пористая керамика $\delta = 5$ мм	120	3	10	35	3,78	0,65	0,68	49,5	52
Пористая керамика $\delta = 5$ мм	120	5	10	52	5,45	0,6	0,65	51,8	52,5
Асбест листовой $\delta = 6$ мм	120	3	20	30	3,56	0,77	0,76	42	43
Асбест листовой $\delta = 6$ мм	120	5	19,5	39	4,5	0,7	0,73	43	44
Глина $\delta = 12$ мм	120	3	11,5	40	4,6	0,65	0,64	44	46
Глина $\delta = 12$ мм	120	5	11,2	48,5	5,51	0,71	0,7	45	45

Запишем уравнения (7), (8) и (10) в следующем виде:

$$\theta_{II} = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{o.c.}}; \quad (12)$$

$$\theta_{II} = \frac{rj}{\bar{\alpha}(t_c - t_{o.c.})}; \quad (13)$$

$$t_{II} = t_c - \frac{rj}{\alpha}, \quad (14)$$

где j и α – соответственно интенсивность испарения и коэффициент теплообмена в периоде убывающей скорости сушки.

В таблице 3 дано сравнение расчетных значений t_{II} и θ_{II} по уравнениям (12) и (14) с экспериментом при сушке для пористой керамики и листового асбеста.

Таблица 3

Сравнение расчетных значений t_{II} и θ_{II} по уравнениям (12) и (14) с экспериментом при сушке
для пористой керамики и листового асбеста

Материал	Режим сушки		$W_{кр},$ %	$\bar{\alpha}_{кр},$ Вт/м ² ·°С	$j_0,$ кг/м ² ·ч	θ_{II} (12)	θ_{II} экс	$t_{II}, ^\circ\text{C}$ (14)	$t_{II}, ^\circ\text{C}$ экс
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$U, \text{ м/с}$							
Пористая керамика $\delta = 5$ мм	120	3	8	26	2	0,54	0,55	68	66
			6	23	1,61	0,46	0,44	73	75
			4	20	1,05	0,35	0,3	87	90
			1	10	0,2	0,1	0,11	108	110
Асбест листовой $\delta = 6$ мм	120	5	16	45	4,15	0,55	0,57	59,7	60
			12	36	2,51	0,45	0,47	74	76
			8	30	1,5	0,27	0,285	88,5	90
			4	26	0,31	0,09	0,1	118	114

Видно, что температура поверхности материала t_{II} во втором периоде сушки определяется с достаточной точностью. Следовательно, результаты аналитического решения задачи по нагреванию влажного тела при $t_c = const$, полученные А.В. Лыковым [1], применимы и к периоду убывающей скорости сушки. Предлагаемая методика расчета температуры влажного материала является универсальной. Обработка экспериментальных данных показала, что использование данного метода для определения тем-

пературы в процессе сушки войлока, фетра, подошвенной кожи, шерстяных тканей дает вполне удовлетворительные совпадения расчетных значений с экспериментом.

На рисунках 1 и 2 изображены зависимости относительной температуры $\theta = f(\tau)$ и $\lg \theta = f(\tau)$ для пористой керамики, глины и листового асбеста при различных режимах сушки.

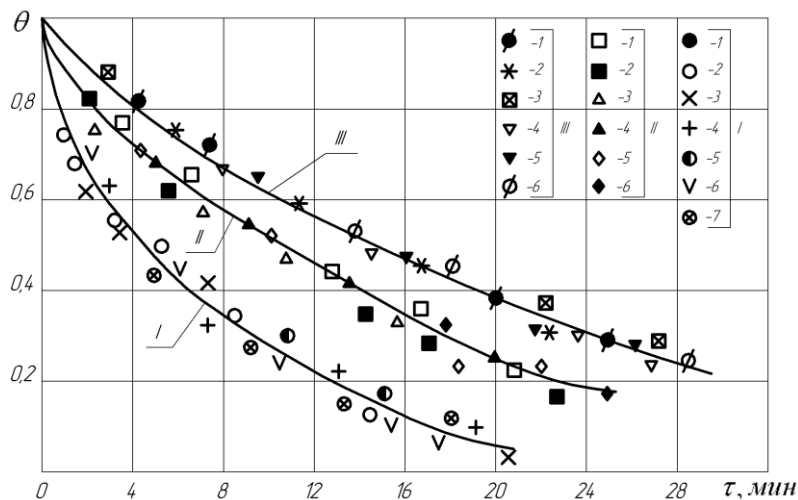


Рис. 1. Зависимость относительной температуры $\theta = f(\tau)$ для пористой керамики, глины и асбестовой пластины в процессе сушки при режимах:
 I – пористая керамика, $\delta = 5$ мм; 1 – $t_c = 90$ °С, $\nu = 5$ м/с; 2 – $\nu = 10$ м/с; 3 – $t_c = 120$ °С; $\nu = 3$ м/с;
 4 – $\nu = 5$ м/с; 5 – $\nu = 10$ м/с; 6 – $t_c = 150$ °С, $\nu = 5$ м/с; 7 – $\nu = 10$ м/с;
 II – глина, $\delta = 12$ мм; 1 – $t_c = 90$ °С, $\nu = 3$ м/с; 2 – $\nu = 5$ м/с; 3 – $t_c = 120$ °С; $\nu = 3$ м/с; $\nu = 5$ м/с;
 4 – $\nu = 10$ м/с; 5 – $t_c = 150$ °С, $\nu = 3$ м/с; 6 – $\nu = 5$ м/с;
 III – асбестовая пластина, $\delta = 6$ мм; 1 – $t_c = 90$ °С, $\nu = 3$ м/с; 2 – $\nu = 5$ м/с; 3 – $t_c = 120$ °С; $\nu = 3$ м/с;
 4 – $\nu = 5$ м/с; 5 – $t_c = 150$ °С, $\nu = 3$ м/с; 6 – $\nu = 5$ м/с

Максимальный разброс опытных точек не превышает 5...7 %, что находится в пределах точности эксперимента. Обработкой опытных данных, представленных на рисунке 2, методом наименьших квадратов, определяется коэффициент β в уравнениях (1) и (2).

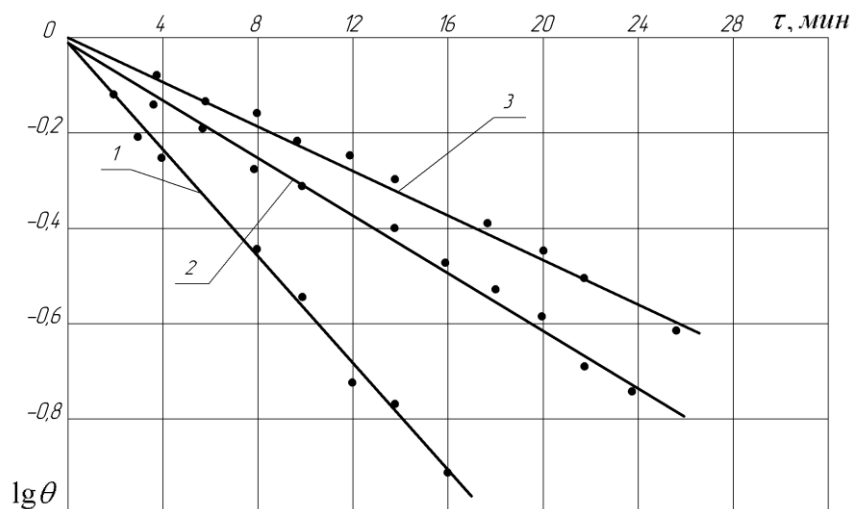


Рис. 2. Зависимость $\lg \theta = f(\tau)$ в процессе сушки при режимах, указанных на рисунке 1:
 1 – пористая керамика; 2 – глина; 3 – листового асбест

В таблице 4 даны значения коэффициента β для некоторых материалов. Коэффициент β характеризует скорость изменения температуры на поверхности материала t_{Π} .

Таблица 4

Значения коэффициента β для пористой керамики, глины и листового асбеста

Наименование материала	Режим сушки			β
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м/с}$	$\phi, \%$	
Пористая керамика	90...150	3...5	5	0,12
Глина	90...150	3...5	5	0,066
Листовой асбест	90...150	3...5	5	0,055

Графическая зависимость $\lg \theta = f(\tau)$ описывается уравнением:

$$\theta = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{o.c.}} = \exp(-\beta\tau) \tag{15}$$

Коэффициент β зависит от рода материала и не зависит от режима сушки в указанном интервале изменения режимных параметров.

Можно провести аналогию между теплообменом и влагообменом в процессе сушки.

Запишем

$$\theta_{II} = \exp(-\beta\tau) \tag{16}$$

$$N^* = \exp(-aN\tau) \tag{17}$$

где N^* – относительная скорость сушки; $N \cdot \tau$ – обобщенное время сушки; N – скорость сушки в первом периоде.

Коэффициент a определяется по соотношению:

$$a = \frac{0,8}{W_{кр}} \tag{18}$$

Таким образом, аналитические и экспериментальные исследования подтверждают аналогию между процессами тепло- и массообмена [3].

Из аналитического решения задачи по нагреванию влажного тела при $t_c = const$ следует, что относительная температура влажного тела θ и температура поверхности материала t_{II} [1; 2] составляют:

$$\theta = (Fo, Pd) = f(\beta\tau) \quad \text{и} \quad t_{II} = f(Fo, Pd) = f(\beta\tau) .$$

На рисунке 3 изображены зависимости $\lg t_{II} = f(\lg \beta\tau)$ и $\lg t_{II} = f(t_c)$ в процессе сушки пористой керамики при режимах сушки, указанных на рисунке 1.

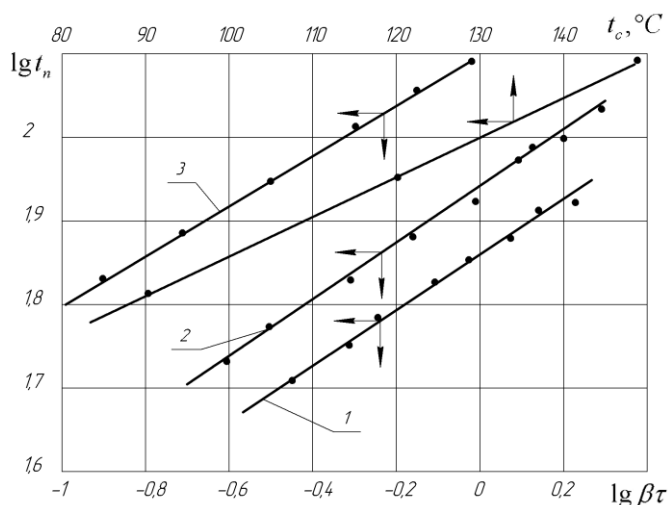


Рис. 3. Зависимости $\lg t_{II} = f(\lg \beta\tau)$ и $\lg t_{II} = f(t_c)$ в процессе сушки пористой керамики при режимах сушки:

1 – $t_c = 90 ^\circ\text{C}$; 2 – $t_c = 120 ^\circ\text{C}$; 3 – $t_c = 150 ^\circ\text{C}$ при $v = 3, 5, 10 \text{ м/с}$

Эти линейные зависимости описываются уравнениями:

$$t_{II} = C_0(\beta\tau)^{0,4}; \quad (19)$$

$$C_0 = 22\exp 0,01t_c. \quad (20)$$

В таблице 5 дано сопоставление расчетных значений t_{II} по уравнениям (19) и (20) с экспериментом в процессе сушки тонкой пористой керамики при следующем режиме: $t_c = 120$ °С, $\nu = 3$ м/с. Совпадение расчетных значений t_{II} с экспериментом удовлетворительное.

Таблица 5

Сопоставление расчетных значений t_{II} с экспериментом в процессе сушки пористой керамики
(режиме сушки: $t_c = 120$ °С, $\nu = 3$)

τ , мин	W , %	$\beta\tau$	t_{II} °С (19)	t_{II} °С _{экс}
6,7	10	0,8	65	64
8,5	8	1,02	73	71
10,3	6	1,24	78	76,5
14	4	1,68	90	90
19	2	2,28	101,5	102

Анализ результатов экспериментальных исследований. Рассмотрим влияние критерия Фурье Fo на распределение температуры во влажном теле θ .

Исследователь А.В. Лыков отмечает, что если распределение температуры в телах подобны между собой, то для них величина $a\tau/R^2$ должна иметь одинаковое значение [3]. Поэтому при заданном начальном распределении температуры последующие распределения зависят от сочетания величины $a\tau/R^2$, которое является обобщенной переменной. Критерий Фурье Fo приобретает смысл обобщенного времени.

Следовательно, распределение температуры для одного вида материала с одинаковым характерным размером $R = \delta$ является подобным, а величина критерия Фурье Fo должна иметь одинаковое значение для различных режимов сушки при одинаковых значениях времени сушки τ .

На рисунке 4 представлена зависимость относительной температуры $\theta = f(Fo)$ в процессе сушки пористой керамики толщиной $\delta = R = 5$ мм при различных режимах сушки.

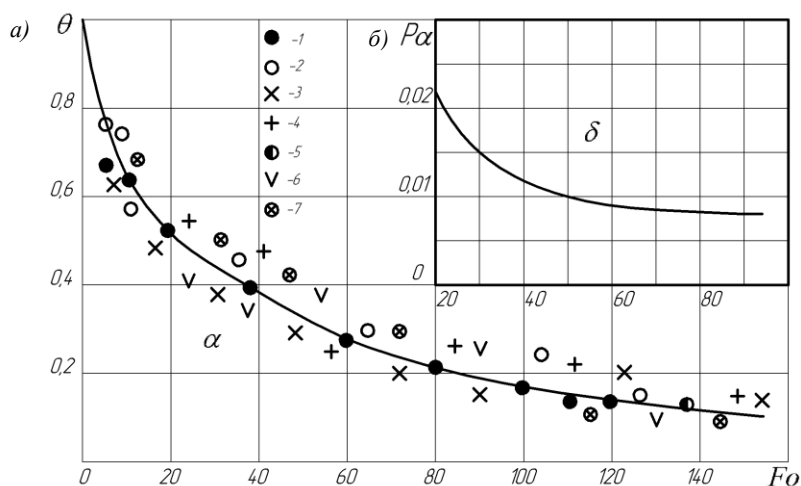


Рис. 4 (а, б). Зависимость относительной температуры θ и критерия Предводителя Pd от критерия Фурье Fo в процессе сушки пористой керамики при режимах, указанных на рисунке 1

Обработка экспериментальных данных показала, что для одного материала с характерным размером $R = \delta$ все опытные точки с допустимым разбросом укладываются на одну кривую.

Зависимость $\theta = f(Fo)$ описывается уравнением:

$$\theta = 0,72 \exp(-0,014Fo). \quad (21)$$

Установить влияние критерия Предводителя Pd на температуру поверхности материала t_{II} представляет трудности, поскольку критерий Pd во втором периоде сушки изменяется при заданном размере R только за счет изменения коэффициента температуропроводности a (см. рис. 4, б). Значения относительной температуры θ вычисленные по уравнениям (15) и (21) практически находятся в пределах точности эксперимента.

Выводы. Экспериментальное исследование теплообмена в процессе сушки тонких плоских материалов, проведенное на основе аналитического решения задачи на нагревание влажного тела, позволило получить уравнения для определения температуры материала в периоде убывающей скорости сушки. Полученные в результате обработки опытных данных уравнения с достаточной точностью определяют температуру поверхности влажного тела в процессе сушки войлока, фетра, подошвенной кожи, тканей. Для тонких плоских влажных материалов предлагаемый метод расчета является универсальным. Предлагаемый метод расчета температуры влажного материала в периоде падающей скорости сушки для тонких плоских материалов является универсальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. школа, 1967. – 600 с.
2. Пехович, А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Л.: Энергия, 1968. – 303 с.
3. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.Л. Михайлов. – М.– Л.: Энергия, 1963. – 584 с.

Поступила 10.06.2011

TEMPERATURE OF WET MATERIAL IN THE PROCESS OF DRYING OF THIN FLAT MATERIALS

A. OLSHANSKY, V. OLSHANSKY

The investigation of heat exchange in the process of drying of thin flat materials is carried out. The results of analytical task solution were used for wet body heating at constant temperature of heat carrier. The equations for determining of materials temperature for the second period of drying process are obtained.