

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

УДК 685.34.025.44:536.3

А. И. ОЛЬШАНСКИЙ, Е. Ф. МАКАРЕНКО, В. И. ОЛЬШАНСКИЙ, С. Г. КОВЧУР

КИНЕТИКА ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ЗАГОТОВОК ВЕРХА ОБУВИ

Витебский государственный технологический университет

(Поступила в редакцию 22.03.2007)

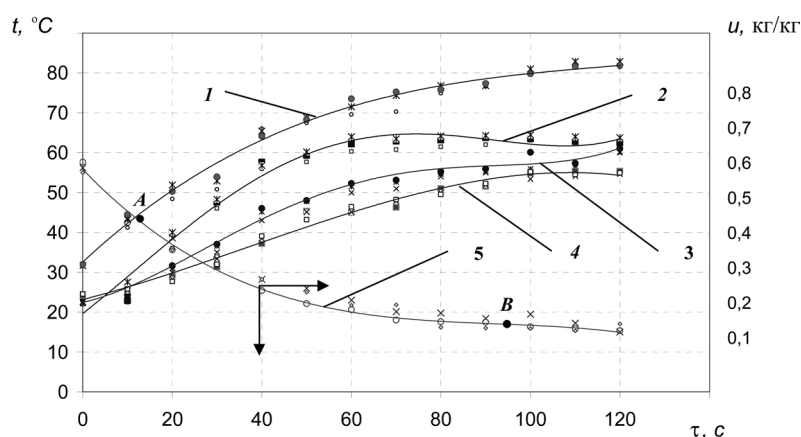
Проблема энергосбережения, технологического обеспечения процессов влажно-тепловой обработки и сушки обуви, а также повышение качества и формоустойчивости обуви является актуальной научной проблемой. Для обеспечения качества продукции необходимо проведение комплекса научных исследований процессов термофиксации и сушки обувных заготовок: исследование закономерности распределения температуры по толщине пакета обувных материалов, изучение различных способов подвода тепла к материалам обувной заготовки. В настоящее время при формировании заготовок верха обуви из эластичных и термопластичных материалов в основном применяются конвективный и терморadiационный способы сушки и термообработки.

Для изучения основных закономерностей процесса тепломассообмена в заготовках верха обуви, составы которых приведены в табл. 1, в процессе обработки термоизлучением были проведены экспериментальные исследования на специальной терморadiационной установке, соответствующей требованиям международных стандартов и описанной в ISO 6942-81-E.

Т а б л и ц а 1. Составы экспериментальных пакетов материалов для верха обуви (размеры образцов 70×220 мм)

Состав заготовки	Материал	δ , мм	$\Sigma \delta$, мм	G_c , г	\bar{u}_0 , кг/кг
1	Верх – юфть КРС термоустойчивая	2,16	4,7	46,8	0,46
	Подносок – термофлекс	1,42			
	Межподкладка – термобязь арт. Б-142	0,48			
	Подкладка – термотрикотаж	0,55			
2	Верх – кожтовар Анилин № 313–62	1,76	4,3	39,6	0,46
	Подносок – термофлекс	1,42			
	Межподкладка – термобязь арт. Б-142	0,48			
	Подкладка – термотрикотаж	0,55			

Кинетика сушки влажных материалов термоизлучением принципиально не отличается от кинетики конвективной сушки. Кривые сушки и кривые скорости сушки типичны при обоих способах подвода тепла. Однако при сушке влажных материалов и сухой термообработке термоизлучением наблюдаются характерные различия, обусловленные методом энергоподвода. В воздушно-сухом состоянии многие материалы (ткани, тонкие кожи и др.) относятся к материалам с большой проницаемостью для инфракрасных лучей внутрь тела, а во влажном состоянии практически непроницаемы [1–3]. Проникновение инфракрасных лучей внутрь тела вызывает аномальное распределение температур по толщине. Только в начале процесса прогревания тела, когда температура среды t_c выше температуры поверхности тела t_n , распределение ее имеет тот же характер, что и при сушке конвекцией. Затем температура центральных слоев $t_{ц}$ оказывается



Кривые изменения температур по толщине образцов для сухих и влажных пакетов материалов и кривая сушки: 1 – $t_{\text{ц}}$ сухих образцов; 2 – $t_{\text{п}}$ влажных образцов; 3 – $t_{\text{ц}}$ влажных образцов; 4 – $t_{\text{п}}$ сухих образцов; 5 – кривая сушки.

выше температуры поверхности $t_{\text{п}}$. Особенно это характерно при обработке термоизлучением пакетов в воздушно-сухом состоянии, а для влажных материалов этот эффект определяется степенью проницаемости излучения внутрь тела.

Из рисунка следует, что влажные пакеты практически непроницаемы для инфракрасных лучей а распределение температур по толщине имеет тот же характер, что и при конвективной сушке (т. е. $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{ц}}$). Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что глубина максимума температуры не совпадает с глубиной проникновения инфракрасного излучения. Только в тонких пакетах обе экстремальные зоны сближаются.

Проникновение инфракрасных лучей в глубь материала зависит от длины волны максимума излучения, которая определяется законом Вина ($\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{const}$). Еще исследования П. Д. Лебедева [4] показали, что максимальная глубина проникновения инфракрасных лучей зависит от спектральных оптических свойств материала, от длины волны, температуры излучателя. По данным П. Д. Лебедева [1, 2, 4], инфракрасные лучи способны проникать для тканей на толщину четырех слоев, для папиросной бумаги – на восемь слоев, для кожи – на 3–5 мм. В большинстве случаев влажные материалы обладают существенно меньшей проницаемостью или вообще непроницаемы для инфракрасных лучей по сравнению с сухими, причем проницаемость уменьшается с увеличением влажности материала.

Для подготовленных к эксперименту сухих и влажных ($u_0 = 0,46$) образцов определены термические сопротивления (δ/λ). Оказалось, что термические сопротивления для влажных пакетов в 2,5–3 раза меньше, чем для сухих. Следовательно, проникающая способность инфракрасных лучей внутрь тела зависит от термического сопротивления пакетов и с уменьшением сопротивления проникающая способность также уменьшается. Рассмотрим механизм переноса тепла и влаги на основе анализа экспериментов по сушке термоизлучением влажных пакетов материалов. За счет быстрого высокотемпературного прогрева материала внутренняя диффузия влаги не успевает за внешней и процесс сушки пакетов, как видно из рисунка, протекает в периоде падающей скорости сушки.

Анализ изменения температуры и влагосодержания влажных пакетов показывает, что градиент влагосодержания всегда имеет положительное значение, т. е. влагосодержание в центре больше, чем на поверхности ($u_{\text{ц}}$ и $u_{\text{п}}$). Диффузионный поток влаги перемещается из центра к поверхности, а градиент температуры имеет отрицательное значение для влажных пакетов ($t_{\text{п}}$ и $t_{\text{ц}}$) и термодиффузионный поток направлен навстречу диффузионному (как при конвективной сушке). По мере удаления влаги с поверхности образцов перепад влагосодержания увеличивается и перенос влаги за счет ∇u больше переноса за счет ∇t , т. е. влага перемещается из центральных слоев к поверхности. Для всего периода падающей скорости сушки у влажных пакетов (рисунок) из-за непроницаемости материала градиент температуры оставался отрицательным ($t_{\text{п}}$ и $t_{\text{ц}}$).

Обработка экспериментальных данных образцов по сушке термоизлучением базируется на уравнении теплового баланса. Тепловой баланс при сушке термоизлучением имеет вид [3]

$$dQ_A = dQ_M + dQ_{\text{исп}} + dQ_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где $dQ_A = dQ_{\text{изл}} - dQ_R - dQ_D$ – часть энергии излучения, поглощаемая влажным материалом, кДж; $dQ_{\text{изл}}$, dQ_R , dQ_D – соответственно энергия излучения, падающая на материал, энергия, отраженная материалом, энергия, прошедшая сквозь тело, кДж; dQ_M – энергия, затраченная на нагрев материала, кДж; $dQ_{\text{исп}}$ – энергия, затраченная на испарение влаги, кДж; $dQ_{\text{пот}}$ – потери энергии в окружающую среду, кДж.

Энергия, затраченная на испарение влаги:

$$dQ_{\text{исп}} = j_{\text{исп}} r F_0 d\tau, \quad (2)$$

где $j_{\text{исп}}$ – интенсивность сушки, кг/(м²·с); r – теплота парообразования, кДж/кг; F_0 – поверхность испарения, м².

Интенсивность сушки определяется уравнением

$$j_{\text{исп}} = \frac{d\bar{u}}{d\tau} \frac{G_c}{F_0}, \quad (3)$$

где $d\bar{u}/d\tau$ – скорость сушки, 1/с; G_c – масса сухого материала, кг.

Уравнение теплового баланса для сушильной камеры при сушке термоизлучением имеет вид [3]

$$EA_{\Pi} F_0 \Delta\tau = G_m c_m \Delta t + j_{\text{исп}} r F_0 d\tau + Q_{\text{пот}}, \quad (4)$$

где E – плотность излучения, определяемая законом Стефана–Больцмана, Вт/м²; A_{Π} – поглощательная способность облучаемого материала; $G_m c_m \Delta t$ – энергия, идущая на нагрев влажных пакетов материалов.

Источником излучения являлись керамические излучатели с длиной волны 2–7 мкм, дающие максимум излучения в интервале 4–7 мкм, степень черноты поверхности излучателя $\epsilon_{\text{изл}} = 0,93$, температура поверхности излучателя $t_{\text{изл}} = 630\text{--}650$ °С. Излучатели располагались на расстоянии $l = 0,2$ м от образцов с мощностью $N = 3$ кВт.

Поглощательная способность влажных пакетов при начальном влагосодержании $\bar{u}_0 = 0,55\text{--}0,46$ принималась из условия наличия у поверхности пакетов тонкой пленки воды $A_{\Pi} = \epsilon_{\text{вл.м}} = 0,94$, угловые коэффициенты облучения в зависимости от расположения излучателя и материала $\varphi_{1-2} = 0,62$ [5].

Результаты обработки экспериментальных данных по сушке влажных пакетов инфракрасным излучением приведены в табл. 2 для двух случаев, представленных на рисунке:

1) $\bar{u}_0 = 0,46$, перепад $\Delta u = \bar{u}_0 - \bar{u}_T = 0,05$ за $\Delta\tau = 10$ с, $u_T = 0,41$ (точка A);

2) $\bar{u} = 0,18$, перепад $\Delta u = \bar{u} - \bar{u}_T = 0,03$ за $\Delta\tau = 10$ с, $u_T = 0,15$ (точка B),

где \bar{u}_T – текущее влагосодержание материала за $\Delta\tau = 10$ с.

При обработке опытных данных использовалось основное уравнение кинетики сушки [1]:

$$q_m = r \rho_0 R_V \frac{d\bar{u}}{d\tau} (1 + Rb), \quad (5)$$

где q_m – плотность теплового потока, кВт/м²; ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; $R_V = V_0 / F_0$ – отношение объема к поверхности абсолютно сухого тела, м; Rb – критерий Ребиндера, определяемый по температурным кривым $\bar{t} = f(\bar{u})$. Обработка опытных данных зависимостей $Rb = f(\bar{u})$ при сушке различными методами проводилась по формуле [6]:

$$Rb = A \exp[-n(\bar{u} - u_p)], \quad (6)$$

где u_p – равновесное влагосодержание материала.

В табл. 2 приведены значения постоянных A и n в формуле (6) для некоторых материалов [6].

В табл. 3 приведены результаты анализа экспериментальных данных при сушке термоизлучением заготовок верха обуви.

Т а б л и ц а 2. Постоянные A и n в формуле (6)

Материал	Режимные параметры			A	n
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м/с}$	$\varphi, \%$		
Кожа для низа обуви	50–70	3–5	15	0,15	8,5
Войлок шерстяной	90–120	3–20	5	0,1	6
Фетр	50	0,5	20–75	0,1	10

Т а б л и ц а 3. Результаты анализа экспериментальных данных при сушке термоизлучением заготовок верха обуви

Расчетная формула	Влагосодержание	
	точка A $u_t = 0,4$	точка B $u_t = 0,15$
$\Delta t, \text{ с}$	10	10
$Q_{\text{полг}} = EA_{\text{п}} F_0 \Delta t, \text{ кДж}$	5,98	2,57
$A_{\text{п}} = \varepsilon_{\text{вл. м.}}, \text{ закон Кирхгофа}$	0,94	0,4
$E = \varepsilon_{\text{изл.}} C_0 [T_{\text{изл.}}/100], \text{ кВт/м}^2$	41,7	41,7
$Q_{\text{м}} = G_{\text{вл. м.}} C_{\text{м}} \Delta t_{\text{м}}, \text{ кДж}$	2,2	0,8
$Q_{\text{исп}} = j_{\text{исп}} r F_0 \Delta t, \text{ кДж}$	3,7	1,75
$\Delta Q_{\text{потг}}, \text{ кДж}$	0,08	0,02
$Q_{\text{м. полг}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{\text{изл.}}/100)^4 - (T_{\text{п. м.}}/100)^4] (F_1/F_2) \varphi_{1-2}, \text{ кВт/м}^2$	39,8	15,6
$\varepsilon_{\text{пр}} = 1/[1/(\varepsilon_{\text{изл.}}) + (F_1/F_2)(1/\varepsilon_{\text{м}} - 1)], \text{ кВт/м}^2$	0,78	0,31
F_1/F_2	1,95	1,95
φ_{1-2}	0,62	0,62
$Q_{\text{полг}} = Q_{\text{м. полг.}} F_0 \Delta t, \text{ кДж}$	6,1	2,43
$q_{\text{м}} = r \rho_0 R_V (du/dt)(1 + Rb), \text{ кВт/м}^2$	10,2	14,9
$du/dt, 1/\text{с}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$Rb = A \exp[-n(u - u_p)]$	0,1	0,3
$Q_{\text{м}} = q_{\text{м}} F_0 \Delta t, \text{ кДж}$	6,18	2,36

Таким образом, к основным факторам, влияющими на интенсивность терморadiационной сушки влажных материалов, можно отнести: спектральные характеристики излучателя, поглощательную способность материала, расположение генератора излучения и объекта облучения, геометрические параметры рабочей камеры и среды. Основными определяющими факторами следует считать температуру излучателя и расстояние излучателя от поверхности материала. Экспериментально установлено [2], что максимум излучения и степень использования энергии можно повысить до 90%, применяя экономичные излучатели (трубчатые, керамические) с правильно рассчитанным размещением по отношению к высушиваемому объекту. Приведенная методика обработки результатов экспериментальных исследований влажных пакетов, как следует из анализа расчетных данных табл. 3, дает вполне удовлетворительные совпадения, в пределах точности проведения экспериментов.

Анализ экспериментальных данных при термообработке сухих и сушке влажных пакетов образцов позволил выявить различия в характере распределения температур по толщине пакетов, получить зависимости $\bar{t} = f(\bar{u})$ для влажных пакетов и определить постоянные, входящие в формулу (6).

Литература

1. Лыков А. В. Теория сушки. М., 1968.
2. Кавказов Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви. М., 1973.
3. Ганин Е. А. и др. Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности. М., 1989.
4. Лебедев П. Д. Сушка инфракрасными лучами. М., 1955.
5. Михеев М. А., Михеева Н. М. Основы теплопередачи. М., 1973.
6. Куц П. С., Ольшанский А. И. Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28, № 4. С. 19–21.

A. I. OLSHANSKY, E. F. MAKARENKO, V. I. OLSHANSKY, S. G. KOVCHUR

KINETICS OF THERMO-RADIATING DRYING OF BLANKS OF FOOTWEAR TOP

Summary

Mechanisms of drying of damp packages of shoe materials and their dry heat treatment are analyzed at a thermo-radiating way of heat supply to material. The design procedure of intensity of thermo-radiating drying on the basis of the equation of thermal balance for drying chambers is developed, allowing to establish initial data for designing highly effective drying installations.