8. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский. – Минск : Инженерно-физический журнал. Т. 23. – № 3. – С.401-407.
9. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А. И. Ольшанский, Е. Ф. Макаренко, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. Т.81. – № 6. – 2008. – С.1102-1110.
10. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. –535 с.
11. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Ленинград : Энергия, 1968. – 303 с.
12. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – Москва : Легкая индустрия, 1973. – С.272.

Статья поступила в редакцию 16.01.2012

SUMMARY

The investigation of drying process of sole leather by the regular regime methods is conducted. The values of heating rate of wet material in the drying process on the basis of processing of sole leather drying values by the method of generalized variables are obtained. The necessary equations for calculation of sole leather drying kinetics are received.

УДК 66.047:3.085.1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ТКАНЕЙ

А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое применение получили декоративные многослойные материалы с использованием натуральных и химических текстильных тканей. Декоративные многослойные материалы используются в обувной, кожгалантерейной промышленности, при производстве высококачественных обоев. Важным этапом производства, определяющим качество готовой продукции, после аппретирования является сушка. Выбор способа сушки и метода энергоподвода определяет энергоэффективность процесса и качество обрабатываемого материала.

Сушка тканей термоизлучением является одним из самых перспективных методов термического обезвоживания тканей. Наряду с интенсификацией процесса сушки за счет возникающих больших удельных тепловых потоков получают значительный технологический и экономический эффект.

Эффективность радиационной сушки тканей заключается еще и в том, что она обеспечивает высокотемпературный нагрев ткани, уменьшает миграцию красителей и аппретов, создает высокую интенсивность испарения влаги с поверхности ткани за счет максимальной глубины проникновения инфракрасных лучей в ткань.

Механизм терморадиационной сушки тканей принципиально не отличается от кинетики конвективной сушки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сушка тканей термоизлучением проводилась на металлической поверхности стола экспериментальной установки при вынужденном и свободном теплообмене.

Витебский государственный технологический университет

Ткань располагалась параллельно близко расположенным (200 мм) излучающим светлым источникам излучения. В качестве излучателей использовались лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома $\varepsilon \approx 0{,}75-0{,}8$ и стекла $\varepsilon \approx 0{,}89-0{,}92$. При принятом расположении ткани от излучающих поверхностей угловые коэффициенты излучения φ, определяющие эффективность поверхности излучения, $\varphi \approx 1$. Степень черноты натуральных тканей $\varepsilon \approx 0{,}75-0{,}9$.

Экспериментальное исследование комбинированной конвективно-терморадиационной сушки тканей проводилось с пятикратной повторяемостью эксперимента для каждого режима сушки с целью получения достоверных результатов.

Сушка тканей проводилась при трех режимах:

1. $t_{изл} = 150\ °C;\ t_C = 80\ °C$; скорость воздуха $\upsilon \approx 0{,}9-1{,}2$ м/с;
2. $t_{изл} = 190\ °C;\ t_C = 100\ °C$; $\upsilon \approx 0{,}9-1{,}2$ м/с;
3. $t_{изл} = 250\ °C;\ t_C = 120\ °C$; $\upsilon = 0$ м/с (свободный теплообмен).

На рис. 1 и 2 изображены кривые сушки $W = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ при комбинированной сушке термоизлучением тканей из вискозы и льна для указанных режимов сушки.

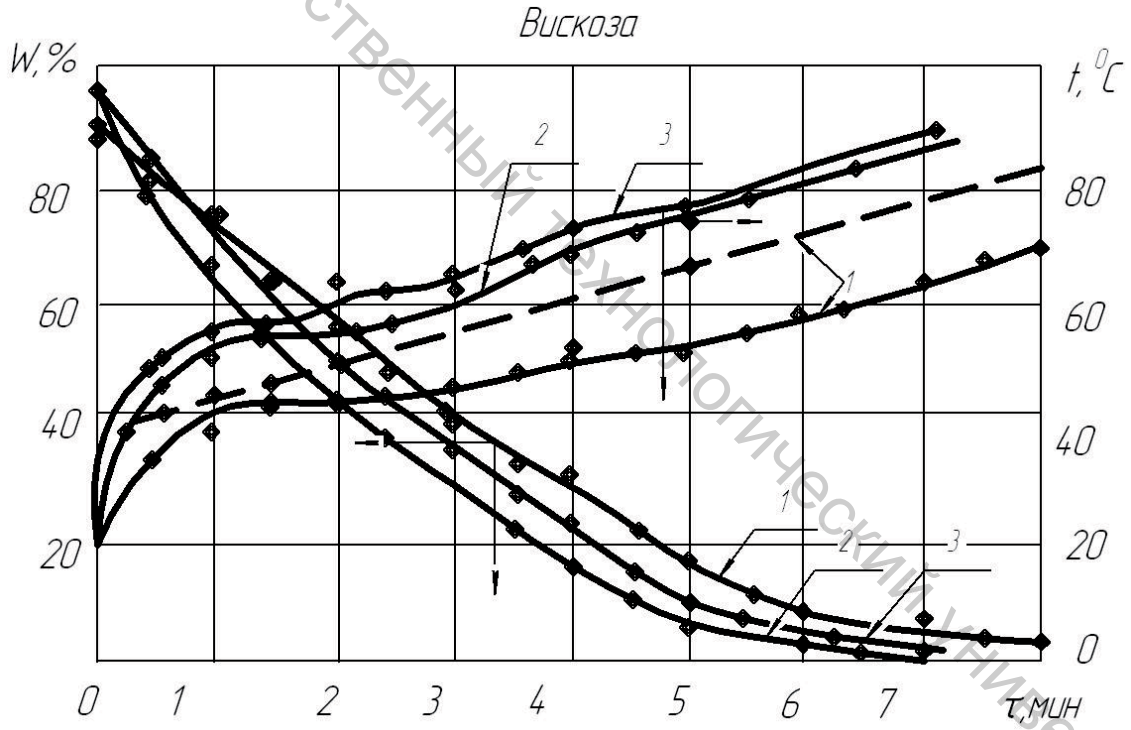


Рисунок 1 – Кривые сушки $W = f(\tau)$ и температурные кривые $\overline{t} = f(\tau)$ при конвективно-терморадиационной сушке ткани из вискозы для режимов:
$1 - t_C = 80\ °C;\ t_{изл} = 150\ °C;\ 2 - t_C = 100\ °C;\ t_{изл} = 190\ °C;\ \nu = 1{,}2$ м/с;
$3 - t_C = 120\ °C$; $t_{изл} = 250\ °C;\ \nu = 0$ м/с

Витебский государственный технологический университет

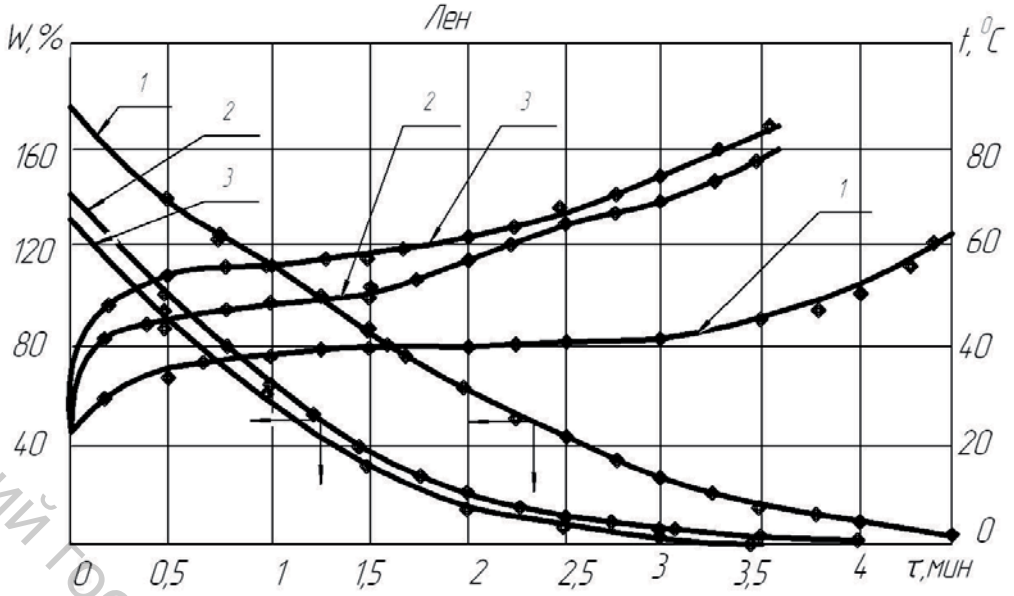


Рисунок 2 – Кривые сушки $W = f(\tau)$ и температурные кривые $\overline{t} = f(\tau)$ при конвективно-терморадиационной сушке ткани изо льна. Режимы сушки указаны на рис. 1

Видно, что кинетика процесса сушки тканей термоизлучением принципиально не отличается от кинетики конвективной сушки. Наблюдается кратковременный прогрев ткани, периоды постоянной и падающей скорости сушки.

Однако комбинированная терморадиационная сушка отличается от конвективной высокой интенсивностью испарения влаги с поверхности ткани.

Сушка тканей термоизлучением при принятом способе энергоподвода представляет крайне сложный комбинированный терморадиационно-конвективно-кондуктивный процесс сушки с переменной температурой на металлической поверхности экспериментального стола.

Исследованиями установлено [1], что максимальная глубина проникновения инфракрасных лучей зависит от свойств материала. Для натуральных тканей тепловые лучи проникают на толщину более четырех слоев. В большинстве случаев влажность материала снижает глубину проникновения инфракрасного излучения только в периоде постоянной скорости сушки и поглощение термоизлучения происходит поверхностью материала [1].

Для тонких тканей ($\delta = 0,7 \div 1,2$ мм) в результате проникновения излучения через ткань градиенты температуры и влагосодержания при комбинированной сушке совпадают по направлению, что значительно интенсифицирует процесс сушки.

Механизм комбинированной сушки тканей термоизлучением – сложный процесс тепломассообмена и строгая математическая постановка задачи на нахождение полей влагосодержаний и температуры на основе решения дифференциальных уравнений влаготеплопереноса представляет большие трудности. Поэтому задача исследования ограничивается только изучением внешнего механизма терморадиационной сушки тканей и кинетикой процесса на основе обработки экспериментальных данных.

Обработка экспериментальных данных. При исследовании влаготеплопереноса при сушке тканей термоизлучением воспользуемся результатами аналитического решения задачи на нагревание влажной неограниченной пластины в среде с постоянной температурой $t_c = const$ А. В. Лыкова [2] и методом регулярного режима Г. М. Кондратьева [2, 3].

Витебский государственный технологический университет

Основным признаком регулярного режима нагревания влажного тела при изменении температуры и влагосодержания являются соотношения

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m_t(t_C - \bar{t}); \tag{1}$$

$$-\frac{dW}{d\tau} = m_u\left(W - W_p\right), \tag{2}$$

где $d\bar{t}/d\tau$ и $dW/d\tau$ – скорости изменения температуры и влагосодержания во времени; t_C – температура среды; $\bar{t}$ и W – среднеинтегральные температура и влагосодержание материала; W_p – равновесное влагосодержание материала; m_t и m_u – темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания, (мин$^{-1}$).

Темп нагревания влажного тела m_t и темп убыли влагосодержания m_u находятся из соотношений на основе эксперимента:

$$tg\varphi_1 = \frac{ln(t_C - t_0) - ln(t_C - \bar{t})}{\tau - \tau_0} = m_t = const; \tag{3}$$

$$tg\varphi_2 = \frac{\ln\left(W_{кр} - W_p\right) - \ln\left(W - W_p\right)}{\tau - \tau_0} = m_u = const, \tag{4}$$

где t_0 – среднеобъемная температура материала в первом периоде сушки; W_{kp} – критическое влагосодержание материала, определяемое по кривым сушки; $\bar{t}$ и W – значения температуры и влагосодержания, соответствующие текущему времени сушки τ.

Отсчет времени сушки в периоде падающей скорости для всех режимов проводится от $\tau = 0$ и влагосодержания W_{kp}. Среднеобъемная температура t_0 в первом периоде вычисляется по соотношению [4]

$$t_0 = 10 + 0{,}29t_C. \tag{5}$$

На рис. 3 а и рис. 4 изображены зависимости $ln(t_C - \bar{t}) = f(\tau)$ и $ln(W - W_p) = f(\tau)$ для вискозной и льняной тканей при терморадиационно-конвективной сушке.

Видно, что в стадии регулярного режима эти графики имеют вид прямых.

Значения m_t и m_u для некоторых влажных материалов даны в таблице 1.

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

Материал	δ, мм	$W_{кр}$, %	Режим сушки		m_t, мин$^{-1}$	m_u, мин$^{-1}$
			t_c, ºС	υ, м/с		
Войлок	8–10	75–80	90–150	3–10	0,02	0,08
Фетр	4	35–40	50–60	0,5–0,8	0,02	0,08
Подошвенная кожа	4	57–60	40–60	3–5	0,04	0,055
Вискозная и льняная ткань	0,7–1,2	60–80	80–120 $t_{изм}$=150–250	0–1,2	0,11	0,45

Витебский государственный технологический университет

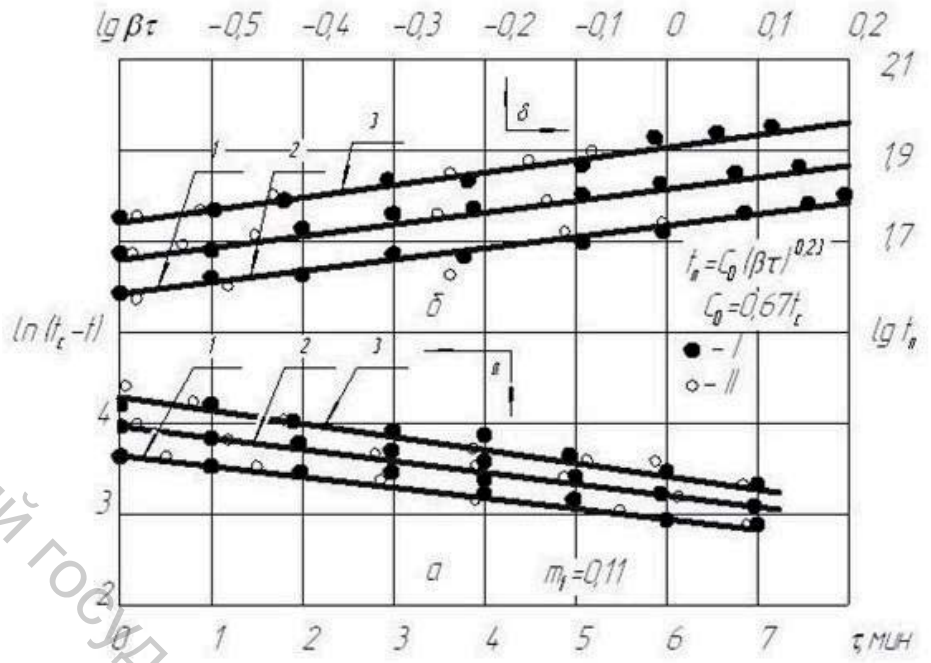


Рисунок 3 а, б – Зависимость $\ln\left(t-t_c\right)=f\left(\tau\right)$ при комбинированной сушке вискозной и льняной ткани термоизлучением при режимах: а) $1-t_c=80°\text{C}$; $t_{изл.}=150℃$; $\upsilon=1,2\text{м/с}$; $2-t_c=100°\text{C}$; $t_{изл.}=190℃$; $\upsilon=1,2\text{м/с}$; $3-t_c=120°\text{C}$; $t_{изл.}=250℃$; $\upsilon=0\text{м/с}$. I – вискоза, II – лен;

б) зависимость $\lg\theta=f\left(\tau\right)=f\left(\lg t_л\right)$ для комбинированной сушки вискозной и льняной ткани термоизлучением при режимах, указанных на рис. 3 а

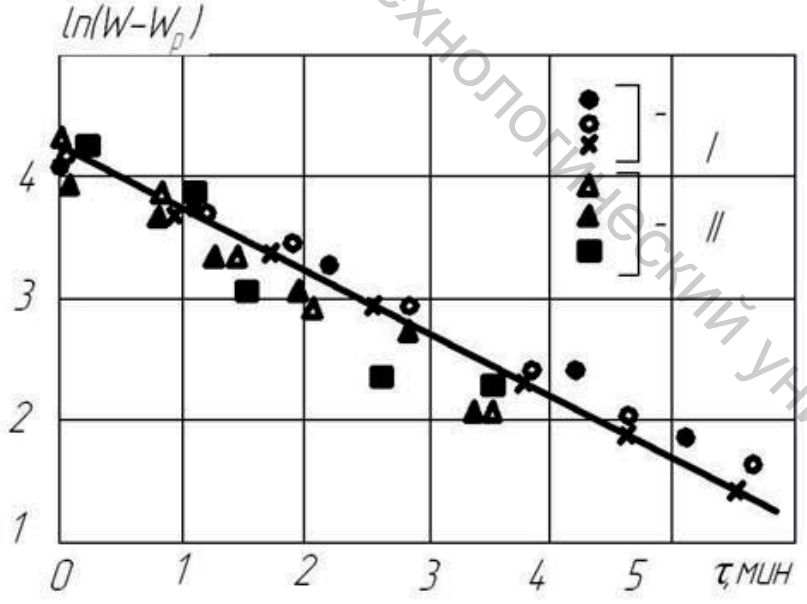


Рисунок 4 – Зависимость $\ln\left(W-W_p\right)=f\left(\tau\right)$ при комбинированной сушке вискозной и льняной ткани термоизлучением при режимах: I – вискоза: $1-t_c=80°\text{C}$; $t_{изл.}=150℃$; $\upsilon=1,2\text{м/с}$; $2-t_c=100°\text{C}$; $t_{изл.}=190℃$; $\upsilon=1,2\text{м/с}$; $3-t_c=120°\text{C}$; $t_{изл.}=250℃$; $\upsilon=0\text{м/с}$; II – лен: $4-t_c=80°\text{C}$; $t_{изл.}=150℃$;

Витебский государственный технологический университет

$\upsilon = 1,2$м/с ; $5 - t_c = 100°C$; $t_{изл.} = 190℃$; $\upsilon = 1,2$м/с ; $6 - t_c = 120°C$; $t_{изл.} = 250℃$; $\upsilon = 0$м/с

Из решения уравнений (1), (2) с учетом выражений (3), (4) находится время сушки τ и температура материала $\bar{t}$ в периоде убывающей скорости [4]:

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_t} ln\left(\frac{t_C - t_0}{t_C - \bar{t}}\right); \quad (6)$$

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_u} ln\left(\frac{W_{кр} - W_p}{W - W_p}\right). \quad (7)$$

С учетом времени сушки в первом периоде $\tau_I = W_0 - W_{кр} / N$ – продолжительность сушки тканей до заданного влагосодержания равна:

$$\tau = \frac{W_0 - W_{кр}}{N} + \frac{1}{m_u} ln\left(\frac{W_{кр} - W_p}{W - W_p}\right), \quad (8)$$

где $N = dW / d\tau$ – максимальная скорость сушки в первом периоде; W – текущее влагосодержание материала.

Из уравнения (6) находится среднеинтегральная температура в процессе сушки тканей:

$$t = t_C - \frac{t_C - t_0}{exp(m_t \tau)}, \quad (9)$$

где τ – время сушки от начального W_0 до текущего значения влагосодержания W.

При исследовании теплообмена в процессе сушки воспользуемся результатами аналитического решения дифференциального уравнения на нагревание влажной неограниченной пластины в среде с постоянной температурой $t_C = const$ при граничных условиях третьего рода (сушка) А. В. Лыкова [2, 5].

Из решения задачи можно записать:

$$\theta = \frac{t_C - t_П}{t_C - t_{о.с.}} = f(exp\, Fo \cdot Pd) = f(exp\, \beta\tau), \quad (10)$$

где $t_П, t_{о.с.}$ – температуры поверхности влажного материала и окружающей среды; Fo – критерий Фурье; Pd – критерий Предводителева;

Произведение критериев Фурье Fo и Предводителева Pd представляет соотношение [4, 5]

$$Fo \cdot Pd = \frac{a\tau}{R^2} \cdot \frac{\beta R^2}{a} = \beta\tau,$$

где β – скорость изменения температуры на поверхности влажного тела, мин$^{-1}$; θ – относительная температура влажного тела, м; a – коэффициент температуропроводности, м^2/с; R – характерный размер тела, м; τ – время сушки, мин.

Витебский государственный технологический университет

На рис. 5 представлена зависимость $\lg\theta = f(\tau)$ при сушке вискозы и льна.

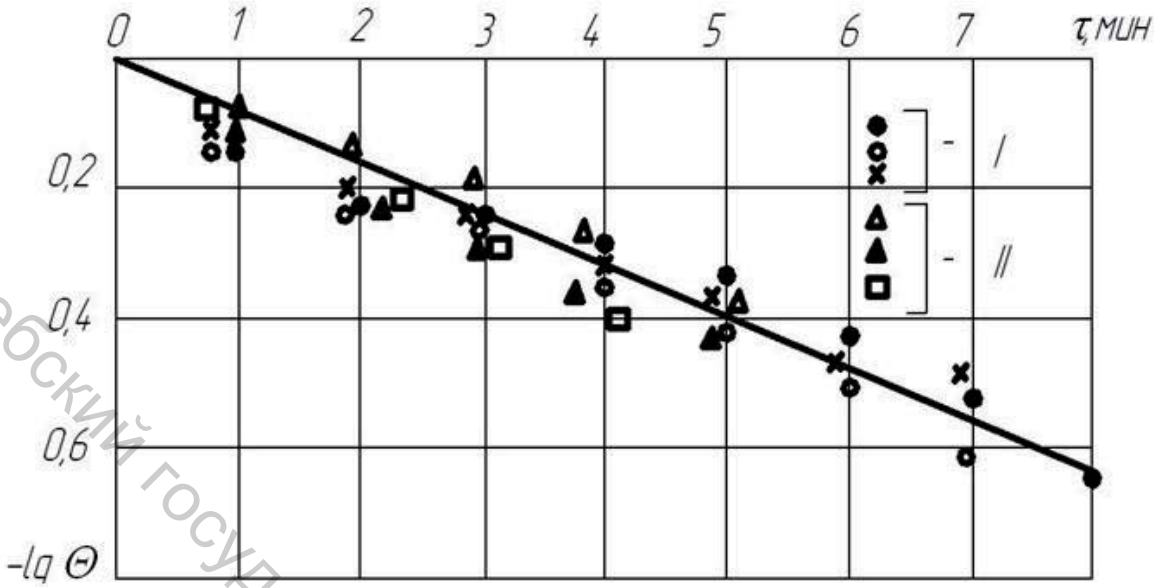


Рисунок 5 – Зависимость относительной температуры $\lg\theta = f(\tau)$ для комбинированной сушки вискозной и льняной ткани термоизлучением при режимах, указанных на рис. 1 I – вискоза, II – лен

Обработкой зависимости $\lg\theta = f(\tau)$ (рис. 5) получено значение коэффициента β при сушке тканей β = 0,25 мин$^{-1}$.

Из выражения (10) определяется температура тканей в процессе сушки:

$$\bar{t} = t_П = t_С - (t_С - t_{о.с.})\,exp(-0{,}25\tau)\,. \qquad (11)$$

Изменение температуры тканей в процессе сушки можно также выразить и в виде степенной зависимости $t_П = f(\beta\tau)^m$.

На рис. 3 б дана зависимость $lg\,t_П = f(lg\,\beta\tau)$ в процессе комбинированной сушки тканей термоизлучением при различных режимах.

Обработкой экспериментальных данных, представленных на рис. 3 (б) методом средних, получено уравнение для вычисления температуры тканей в процессе комбинированной сушки:

$$t_П = B_1(\beta\tau)^{0,23}\,, \qquad (12)$$

$$B_1 = 0{,}7t_С\,. \qquad (13)$$

С целью проверки достоверности полученных результатов обработки экспериментальных данных проведено сопоставление расчетных значений времени сушки и температуры тканей по уравнениям (8), (9), (11) и (12) с экспериментом, представленное в таблице 2. Видно, что расчетные значения параметров, определяемые по формулам, хорошо согласуются с экспериментом.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2 – Сравнение расчетных значений времени сушки и температуры тканей по уравнениям (8), (9), (11) и (12) с экспериментом при комбинированной сушке

Вискоза: $t_{изл} = 150\ °C;\ t_C = 80\ °C;\ \upsilon = 1{,}2$ м/с						
W, %	$\tau_{экс}$, мин	τ, мин (8)	$\bar{t}_{экс}$, °C	$\bar{t}$, °C (9)	t, °C (11)	t, °C (12)
80	0,51	0,53	35	36,3	30,5	34,6
60	1,65	1,58	41,2	40,7	41	41,5
40	2,98	2,88	45,5	46,2	46,5	46,9
20	4,69	4,36	53,5	52,5	54,9	53,5
10	6	5,92	58,5	56,7	59,5	56,9
Вискоза: $t_{изл} = 190\ °C;\ t_C = 100\ °C;\ \upsilon = 1{,}2$ м/с						
80	0,75	0,70	42,5	42,5	39	41,8
60	1,35	1,25	51	49,8	48,7	52,5
40	2,25	2,1	58,5	57,8	57,5	60
20	3,85	3,78	67	66,6	68,9	67,5
10	5	5,1	70	68,5	73	71
Лен: $t_{изл} = 150\ °C;\ t_C = 80\ °C;\ \upsilon = 1{,}2$ м/с						
120	0,8	0,8	38	37,5	36,1	38,6
80	1,65	1,75	40	41,5	40	43,5
40	2,65	2,58	42,5	43,5	44,2	45,6
10	4,15	4,6	53	51,5	55,1	54,4
Лен: $t_{изл} = 190\ °C;\ t_C = 100\ °C;\ \upsilon = 1{,}2$ м/с						
100	0,65	0,6	44	43,5	40	44,4
80	0,75	0,76	47	45,5	46,5	47,6
60	1,35	1,31	50	47,5	48,5	52,5
40	1,55	1,95	52	49,7	53	49,8
10	4,25	4,7	71	70	73,5	72,5

Из решения этой же задачи А. В. Лыковым [2] получен также критерий, который представляет отношение психрометрической разности $(t_C - t_M)$ к избыточной температуре окружающей среды $(t_C - t_{o.c.})$:

$$\theta_M = \frac{t_C - t_M}{t_C - t_{o.c.}}; \tag{14}$$

$$\theta_M = \frac{rj_0}{\bar{\alpha}_{кр}(t_C - t_{o.c.})}, \tag{15}$$

где t_M – температура мокрого термометра, равная температуре поверхности материала в периоде постоянной скорости сушки; j_0 – интенсивность испарения влаги в первом периоде, кг/м^{2}ч; $\bar{\alpha}_{кр}$ – коэффициент теплообмена в первом периоде, Вт/м^2·ºС; r – теплота парообразования, кДж/кг; θ_M – относительная температура в первом периоде сушки.

Теплота парообразования вычисляется по формуле

$$R = 2490 - 2{,}3\,\bar{t} \tag{16}$$

Витебский государственный технологический университет

Из уравнения (14) и (15) имеем:

$$t_M = t_C - \frac{rj_0}{\bar{\alpha}_{кр}}. \quad (17)$$

Таким образом, относительная температура θ_M приобретает значение параметрического критерия. Метод обработки экспериментальных данных с использованием результатов аналитических решений придает исследованию процесса сушки более обобщенный характер, сближает теорию с практикой сушки.

Уравнения (15) и (17), установленные А. В. Лыковым [2] для периода постоянной скорости сушки, используем в расчетах периода падающей скорости.

Запишем уравнения (15) и (17) в виде

$$\theta_M = \frac{t_C - t_П}{t_C - t_{о.с.}} = \frac{rj_0}{\bar{\alpha}(t_C - t_{о.с.})}; \quad (18)$$

$$t_П = t_C - \frac{rj}{\bar{\alpha}}, \quad (19)$$

где j и $\bar{\alpha}$ – интенсивность испарения влаги кг/м^2·ч и коэффициент теплообмена в периоде падающей скорости, Вт/м^2 ·ºС.

Коэффициенты теплообмена α при комбинированной сушке тканей термоизлучением определялись по формуле [6, 7] для вынужденного и свободного теплообмена:

$$Nu = 0{,}87\, Re^{0{,}5}\left(\frac{T_C}{T_M}\right)^2 \cdot \left(\frac{T_{изм}}{T_C}\right)^{0{,}45} \cdot \left(\frac{W}{W_{кр}}\right)^{0{,}5}; \quad (20)$$

$$Nu = 0{,}75(Gr \cdot Pr)^{0{,}25}\left(\frac{T_C}{T_M}\right)^2 \cdot \left(\frac{T_{изм}}{T_C}\right)^{0{,}45} \cdot \left(\frac{W}{W_{кр}}\right)^{0{,}5}, \quad (21)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля; T_C, T_M, $T_{изл}$ – абсолютные температуры среды мокрого термометра, излучателя.

Поправка $(W/W_{кр})^{0,5}$ учитывает уменьшение коэффициента теплообмена α с уменьшением влагосодержания. Интенсивность испарения влаги j определялась в экспериментах весовым способом и по кривым сушки

$$j = \frac{1}{100} \cdot \frac{dW}{d\tau} \cdot \frac{G_0}{F}, \text{кг/м}^2\text{ч}, \quad (22)$$

где $dW/d\tau$ – скорость сушки во втором периоде; G_0 – абсолютно сухой вес материала, кг; F – поверхность испарения ткани, м^2.

Анализ экспериментальных данных по комбинированной конвективно-радиационно-кондуктивной сушке ткани показал, что температура металлической поверхности стола оказывалась выше температуры ткани на 5 – 12 ºС (рис. 1) за счет максимальной глубины проникновения излучения через ткань и возникновения кондуктивного дополнительного подвода тепла от металлической поверхности к ткани. При этом значительно возрастает интенсивность испарения влаги за счет

Витебский государственный технологический университет

совпадения градиентов влагосодержания и температуры по направлению к поверхности ткани.

Обработка опытных данных показала, что определяющей температурой в уравнениях (18) и (19) при сушке термоизлучением является не температура среды t_C, а температура излучателя $t_{изл}$. Уравнение (19) примет вид:

$$t_П = \bar{t} = t_{изл} - \frac{rj}{\bar{\alpha}}. \quad (23)$$

Для тонких тканей среднеобъемная температура $\bar{t}$ и поверхности $t_П$ практически одинаковы.

Рассмотрим влияние критерия Фурье Fo на распределение температуры во влажном теле θ. А. В. Лыков [8] отмечает, что если распределение температуры в телах подобны между собой, то для них величина $a\tau / R^2$ должна иметь одинаковое значение. Поэтому при заданном начальном распределении температуры последующие распределения зависят от сочетания величин $a\tau / R^2$, которые образуют обобщенную переменную. Критерий Фурье Fo приобретает смысл обобщенного времени. Следовательно, распределение температуры для одного вида материала с одинаковым характерным размером $R = \delta$ является подобным и величина критерия Фурье Fo должна иметь одинаковое значение для различных режимов сушки при одинаковых значениях времени τ.

На рис. 6 представлена зависимость относительной температуры $\theta = f(Fo)$ в процессе комбинированной сушки тканей термоизлучением при различных режимах.

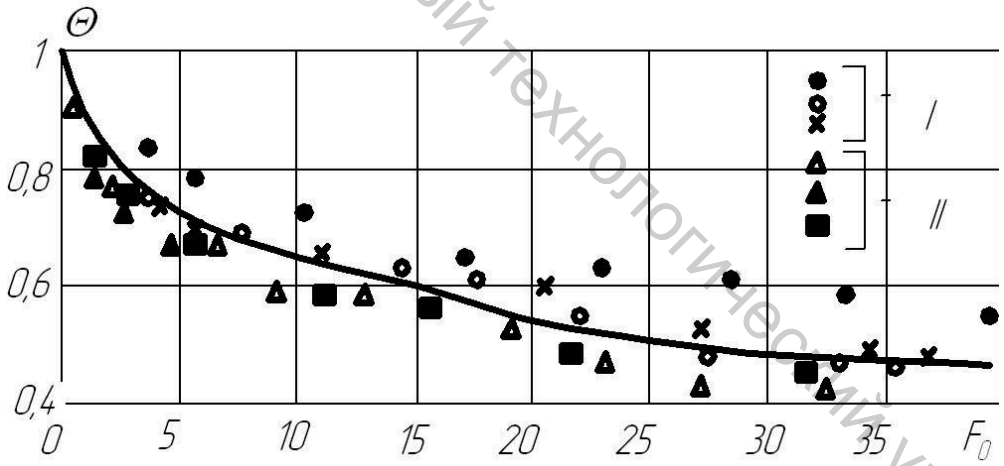


Рисунок 6 – Зависимость относительной температуры θ от критерия Фурье F_o при комбинированной сушке вискозной и льняной ткани термоизлучением. Режимы сушки указаны на рис. 4

Обработка опытных данных показала, что для материала с одним характерным размером R все опытные точки с допустимым разбросом укладываются на одну кривую (рис. 6). Зависимость $\theta = f(Fo)$ приближенно можно описать уравнением

$$\theta = f(Fo)^{-0,18}. \quad (24)$$

Для вычисления критерия Фурье Fo необходимо знать закономерности изменения коэффициента температуропроводности a от температуры и влажности. Коэффициент температуропроводности тканей

Витебский государственный технологический университет

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где λ, c, ρ – соответственно теплопроводность, Вт/м^2 ·ºС; теплоемкость, Дж/кг ·ºС; плотность влажной ткани, кг/м^3.

Зависимость коэффициента теплопроводности λ тканей от температуры в границах от $t \approx 20-70\,°C$ незначительна и при расчетах не учитывается [9].

Влияние влажности на теплопроводность текстильных тканей хорошо исследовано [9] и выражается формулой

$$\lambda = \lambda_0 + 0{,}00144W,\ \text{Вт/м·град},$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности тканей в сухом состоянии; W – влажность тканей на сухой вес.

Теплоемкость влажных тканей определяется выражением [6]

$$c = \frac{c_o + c_в \dfrac{W}{100}}{1 + \dfrac{W}{100}},\ \text{Дж/кг ·ºС},$$

где c_o – теплоемкость сухой ткани; $c_в$ = 4186 кДж/ кг·ºС – теплоемкость воды.

Плотность ρ влажной ткани в процессе сушки измерялась в экспериментах весовым способом.

Вычисленные значения коэффициента температуропроводности a приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость коэффициента температуропроводности для тканей от влажности W

Вискоза $\lambda_0 = 0{,}058\frac{Вт}{м\cdot°C}$; $c_o = 1600\,Дж/кг\cdot°C$					Лен $\lambda_0 = 0{,}046\frac{Вт}{м\cdot°C}$; $c_o = 1500\,Дж/кг\cdot°C$				
W, %	$\lambda, \frac{Вт}{м\cdot°C}$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$c, Дж/кг\cdot°C$	$a\cdot10^4$ м^2/ч	W, %	$\lambda, \frac{Вт}{м\cdot°C}$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$c, Дж/кг\cdot°C$	$a\cdot10^4$ м^2/ч
90	0,187	759	2825	3,14	160	0,276	675	3150	4,67
80	0,173	713	2750	3,17	140	0,248	637	3060	4,58
60	0,144	640	2569	3,15	120	0,219	587	2960	4,537
50	0,13	600	2462	3,16	100	0,19	537	2840	4,49
40	0,116	556	2339	3,24	80	0,161	482	2690	4,48
20	0,087	488	2031	3,16	60	0,132	430	2500	4,47
10	0,072	453	1835	3,11	40	0,104	374	2260	4,41
					20	0,075	321	1946	4,32
					10	0,06	294	1744	4,27

При исследовании теплообмена в процессе комбинированной сушки тканей термоизлучением использовались критериальные уравнения для вынужденного и свободного теплообмена (20), (21) с поправками на излучение.

Плотность потока тепла в периоде убывающей скорости сушки находится из уравнения теплообмена

Витебский государственный технологический университет

$$q = \overline{\alpha}(t_C - t_П),\ \text{Вт/м}^2. \quad (25)$$

Для проверки достоверности полученных при исследовании результатов проведен расчет теплообмена по формуле излучения Стефана-Больцмана [6, 7]

$$q_{изл} = \varepsilon_{пр} C_o \left[\left(\frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi \left(\frac{W}{W_{кр}} \right)^{0,5}, \quad (26)$$

где C_o – коэффициент излучения абсолютного черного тела, C_o = 5,67 Вт/м^2·К^4; φ – угловой коэффициент излучения φ = 1; $(W / W_{кр})^{0,5}$ – поправка на уменьшение тепловых потоков с уменьшением влагосодержания.

Приведенная степень черноты системы определяется выражением [6, 7]

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \varphi \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (27)$$

где ε_1 – степень черноты излучателя (нихром) $\varepsilon_1 = 0,8 \div 0,81$; ε_2 – степень черноты натуральных тканей $\varepsilon = 0,75 - 0,9$.

Результаты сопоставления расчетов по уравнениям (20), (22), (23) (25) и (26) с экспериментом представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Сопоставление расчетов по уравнениям (20), (22), (23) (25) и (26) с экспериментом

W, %	$\overline{\alpha}$, Вт/м^2 °С (20)	$j \cdot 10^3$ кг/м^{2}с (22)	$t_{П,расч}$ °С (23)	$t_{П,экс}$	q, $\frac{Вт}{м^2}$ (25)	$q_{изл}$, $\frac{Вт}{м^2}$ (26)
Вискоза: $t_{изл} = 150\ ^oC, t_C = 80\ ^oC, \upsilon = 1,2$ м/с, $\varepsilon_{пр} = 0,845$						
80	31,6	1,42	42	40	1264	1228
60	29,7	1,33	43	44	1069	1050
40	24,5	1,07	46	46	833	839
20	21	0,85	55	54	546	572
10	17	0,65	59	58	374	383
Лен: $t_{изл} = 190\ ^oC, t_C = 100\ ^oC, \upsilon = 1,2$ м/с, $\varepsilon_{пр} = 0,86$						
120	38,4	2,36	43	41,5	2166	2086
100	35,1	2,15	45	46	1895	1785
80	31,9	1,9	47	47	1691	1562
60	28,9	1,72	48,5	49	1474	1369
40	25,1	1,44	53	51,5	1217	1105
80	22,2	1,21	61	60	888	759
10	17,6	0,92	68,5	67	581	539

Сравнение расчетных значений температуры t в процессе сушки тканей с экспериментом и тепловых потоков по двум разным методам является подтверждением достоверности результатов, полученных при исследовании кинетики процесса сушки ткани термоизлучением.

Витебский государственный технологический университет

ВЫВОДЫ

Проведено исследование кинетики сушки тканей термоизлучением при различных режимах. Обработкой экспериментальных данных по комбинированной терморадиационно-конвективной сушке тканей установлены основные закономерности кинетики сушки. Получены уравнения для определения продолжительности и температуры в процессе сушки тканей. Представлено сопоставление расчетных значений параметров, полученных по предлагаемым уравнениям, с экспериментом. Сравнение расчетных значений с экспериментом показало достаточно удовлетворительное их совпадение в пределах точности проведения эксперимента. Исследование процесса сушки тканей термоизлучением, проведенное авторами, показало, что интенсивность влаготеплообмена значительно выше, чем при конвективной сушке, что сокращает длительность процесса и дает заметный эффект энергосбережения. Результаты исследований могут использоваться в инженерной практике в процессе сушки тканей термоизлучением.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1968. – 470 с.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Лыков, А. В. Тепломассообмен (справочник) / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1971. – 651 с.
4. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки тонких материалов методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский. // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2011. – № 2. – С. 75-81.
5. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Ленинград : Энергия, 1968. – 303 с.
6. Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности : учебное издание для вузов / под общ. ред. Е. А. Ганина. – Москва : Легпромиздат, 1989. – 390 с.
7. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва : Энергия, 1969. – 439 с.
8. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва. – Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
9. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. – Москва : Легкая индустрия, 1965. – 345 с.

Статья поступила в редакцию 12.12.2011

SUMMARY

The process of fabrics drying with thermal radiation under various modes has been investigated.

The data obtained resulted in the equations for calculating major parameteres of the kinetics of fabrics drying with thermal radiation.

The comparative analysis of parametres calculated with equations and those obtained from the experiments has been shown.

The comparative analysis of calculated and experimental data of major kinetic characteristics of the fabrics drying with thermal radiation has shown sufficient adequacy of both experimental and calculated data processing.

Витебский государственный технологический университет