

УДК 66.047:3.085.1

А. И. ОЛЬШАНСКИЙ, В. И. ОЛЬШАНСКИЙ, С. В. ЖЕРНОСЕК

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ
ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ КРИТЕРИЯМИ ПОДОБИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Витебский государственный технологический университет

(Поступила в редакцию 10.01.2014)

Введение. Радиационно-конвективный перенос энергии широко используется в различного рода теплотехнических и технологических процессах. Важными задачами радиационного теплообмена являются расчет теплообмена в топках, высокотемпературный нагрев изделий в промышленных печах, расчет тепловых экранов, термообработка и сушка влажных материалов. [1–3].

Сушка тканей термоизлучением является одним из эффективных методов термического обезвоживания материалов. За счет интенсификации процесса сушки и возникающих больших удельных тепловых потоков получают значительный технологический и экономический эффект [3]. Эффективность радиационной сушки заключается в обеспечении высокотемпературного нагрева ткани, значительном уменьшении миграции красителей и аппретов, создании высокой интенсивности испарения влаги с поверхности материала за счет максимальной глубины проникновения лучей в ткань, что способствует высокому качеству обрабатываемого продукта [3].

Постановка задачи. Сушка тканей термоизлучением проводилась на металлической поверхности стола экспериментальной установки при вынужденном теплообмене. Ткань располагалась параллельно близкорасположенным (250 мм) излучающим светлым источникам излучения. В качестве излучателей использовались лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома $\varepsilon_1 \approx 0,85 - 0,9$, стекла $\varepsilon_2 \approx 0,82 - 0,9$.

При принятом расположении ткани от излучателей угловые коэффициенты излучения φ , определяющие эффективность поверхности излучения, равны 1. Степень черноты натуральных тканей $\varepsilon_m \approx 0,75 - 0,8$. Исследование комбинированной конвективно-терморadiационной сушки тканей проводилось с пятикратной повторяемостью эксперимента для каждого режима для получения достоверных результатов.

Сушка тканей проводилась при режимах: 1. Температура источника излучения $t_{\text{изл}} = 150^\circ\text{C}$; 2. $t_{\text{изл}} = 190^\circ\text{C}$; 3. $t_{\text{изл}} = 250^\circ\text{C}$. 1. Температура теплоносителя (среды) $t_c = 80^\circ\text{C}$; 2. $t_c = 100^\circ\text{C}$; 3. $t_c = 120^\circ\text{C}$; скорость воздуха для всех режимов $v = 0,8 - 1,1$ м/с.

Математическая формулировка задачи по радиационно-кондуктивно-конвективному теплообмену вытекает из решения дифференциального уравнения энергии для сложного теплообмена в плоском слое поглощающей и излучающей среды с непрозрачными серыми границами [1]. В результате решения нелинейного интегродифференциального уравнения энергии с численным решением на ЭВМ методом Ньютона получено безразмерное число [1]

$$\Phi = \frac{\varepsilon_r^* \sigma_0 T_*^3 \delta}{\lambda_*}, \quad (1)$$

где T_* – абсолютная температура излучающей среды по толщине излучающего слоя δ ; λ_* – теплопроводность излучающей непрозрачной среды; ε_r^* – степень черноты газового слоя; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴).

Отношение $1/\Phi$ представляет критерий Больцмана Bo , который характеризует радиационно-конвективный теплообмен. А. Н. Пехович [2] использует критерий Bo для расчета температуры при нагреве и охлаждении твердых тел в прозрачной непоглощающей среде. Для случая радиационного теплообмена критерий Bo имеет вид:

$$Bo = \frac{\lambda}{\varepsilon_{пр} \sigma_0 T_{изл}^3 \delta}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы тел; λ – коэффициент теплопроводности твердого тела.

При использовании критерия Bo для расчета кинетики процесса сушки влажных материалов и построения расчетных графиков необходимо задать дополнительные условия, характеризующие процесс радиационного теплообмена. Расчетный график для определения температуры в процессе нагрева влажного тела представляет зависимость $T^* = f(Bo)$ при заданных значениях безразмерных координаты $x/\delta = 1$ и температуры $T_{ом} / T_{изл}$ [2].

Начальная температура материала $T_{ом}$ для процесса сушки тканей принимается равной температуре окружающей среды $T_{о,с}$, а относительная температура влажного материала задается отношением

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0}, \quad (3)$$

где \bar{t} — среднеинтегральная текущая температура; t_0 — температура материала в первом периоде.

За определяющую температуру при сушке тканей принимается температура теплоносителя (среды) t_c . Степень черноты системы излучатель–материал определяется уравнением

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (4)$$

Критерий Bo для тонких абсолютно сухих тканей толщиной $\delta = 0,8 - 1,2$ мм при заданных значениях степени черноты системы $\varepsilon_{пр}$ и коэффициента теплопроводности сухих тканей λ_0 является функцией только температуры излучателя $T_{изл}$, поскольку значение λ_0 сухих тканей от температуры практически не зависит [4].

Критерий Bo для сухих тканей запишется в виде:

$$Bo_0 = \frac{\lambda_0}{\varepsilon_{пр} \sigma_0 T_{изл}^3 \delta}. \quad (5)$$

Для влажных тканей коэффициент теплопроводности λ_w , теплоемкость c_w , плотность ρ_w в значительной степени зависят от влажности материала.

Для влажной ткани критерий Bo_w запишется в виде:

$$Bo_w = \frac{\lambda_w}{\varepsilon_{пр} \sigma_0 T_{изл}^3 \delta}, \quad (6)$$

где λ_w , c_w , ρ_w – теплопроводность, теплоемкость и плотность влажного тела.

Влияние влажности тканей на теплопроводность и теплоемкость значительно и выражается зависимостями

$$\lambda_w = \lambda_0 + 0,0014 W, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}); \quad (7)$$

$$c_w = \frac{c_0 + c_b \frac{W}{100}}{1 + \frac{W}{100}}, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (8)$$

где c_b – теплоемкость воды.

Плотность влажной ткани ρ_w измерялась в процессе сушки весовым способом. Коэффициент температуропроводности a влажной ткани вычислялся по следующей формуле:

$$a = \frac{\lambda_w}{c_w \rho_w}, \text{ м}^2/\text{ч}. \quad (9)$$

Критерий Фурье Fo определяется по зависимости:

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}, \quad (10)$$

где τ – время сушки ткани; δ – толщина ткани.

Весь комплекс параметров уравнения (9) изменяется таким образом, что коэффициент температуропроводности a в процессе сушки меняется несущественно (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Зависимость коэффициентов переноса тепла от влажности натуральных тканей

Вискоза: $\lambda_0 = 0,058 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; $c_0 = 1600 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$					Лен: $\lambda_0 = 0,046 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; $c_0 = 1500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$				
$W, \%$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$	$a \cdot 10^4, \text{ м}^2/\text{ч}$	$W, \%$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$	$a \cdot 10^4, \text{ м}^2/\text{ч}$
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

Для построения графической зависимости $W_w = f(Fo)$ необходимо знание закономерностей изменения коэффициентов теплопереноса от влажности и температуры материала. Значения коэффициентов переноса тепла, вычисленные по зависимостям (7)–(9), даны в табл. 1.

Длительность сушки можно определить по ее экспериментальным кривым из следующей зависимости:

$$\bar{U} = \frac{W - W_p}{W_0 - W_p} = f(\tau), \quad (11)$$

где \bar{U} – безразмерное влагосодержание; W_0, W, W_p – начальное, текущее и равновесное влагосодержание материала.

Обработка и анализ экспериментальных данных. На рис. 1 изображены кривые сушки $W=f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t}=f(\tau)$ для комбинированной сушки тканей из вискозы и льна при различных режимах. Видно, что кинетика сушки тканей термоизлучением принципиально не отличается от кинетики конвективной сушки.

Наблюдаются периоды постоянной и уменьшающейся скорости на кривых сушки и на температурных кривых. Однако комбинированная терморadiационная сушка отличается от конвективной более высокой интенсивностью испарения влаги с поверхности материала [3].

Температура в первом периоде сушки термоизлучением за счет интенсификации влагообмена оказывается выше, чем при конвективной сушке при одинаковых режимных параметрах процесса. Обработкой опытных данных по терморadiационной сушке тканей получена зависимость для указанных режимов сушки:

$$\bar{t} = \frac{t_c}{0,01t_c + 1,1}. \quad (12)$$

Установлено [3], что максимальная глубина проникновения инфракрасного излучения зависит от свойств материала. Для натуральных тканей, обладающих высокой пористостью и воздухопроницаемостью, тепловые лучи проникают на глубину более четырех слоев. Влажность материала снижает глубину проникновения только в периоде постоянной скорости сушки [3], и поглощение излучения происходит поверхностью материала.

Терморрадиационный критерий Bo_W влажного материала зависит не только от температуры излучателя, но и в значительной степени от коэффициента теплопроводности влажного тела λ_W (табл. 1). На рис. 2 представлены зависимости относительной температуры T^* , задаваемой отношением (3), от отношения критериев Bo_W / Bo_0 и $T^* = f(Bo_W)$ в процессе сушки вискозы при различных режимах. Представленные линейные зависимости описываются следующими уравнениями:

$$T^* = 0,18 + 0,22 \frac{Bo_W}{Bo_0}, \quad (13)$$

$$T^* = b + 0,013 Bo_W, \quad (14)$$

$$b = 1,35 \cdot 10^{-3} T_{изл} - 0,42. \quad (15)$$

Зависимость (15) представлена рис. 2, б.

Средняя по объему температура влажных тканей в процессе сушки вычисляется из уравнения (3):

$$\bar{t} = t_c - T^* (t_c - \bar{t}_0). \quad (16)$$

Температура \bar{t}_0 вычисляется по зависимости (12).

Анализ экспериментов по сушке тканей термоизлучением показал, что отсчет температуры при определении среднеинтегральной температуры \bar{t} удобнее вести от температуры теплоносителя t_c .

Критерий Fo по физическому смыслу представляет обобщенное время, где существенное значение имеет не каждая из величин a , τ , δ в отдельности, а их сочетание в виде комплекса $a\tau/\delta^2$. Поэтому зависимость $T^* = f(Fo)$ справедлива для сушки льняной и вискозной тканей при различных режимах.

Данное сочетание физических параметров является важной обобщенной переменной и при заданном начальном распределении температуры в двух телах все последующие распределения температуры для них будут подобны [5] и величина комплекса $a\tau/\delta^2$ должна иметь одинаковое значение.

На рис. 3 представлены зависимости критерия $Bo_W = f(Fo)$ и относительной температуры $T^* = f(Fo)$.

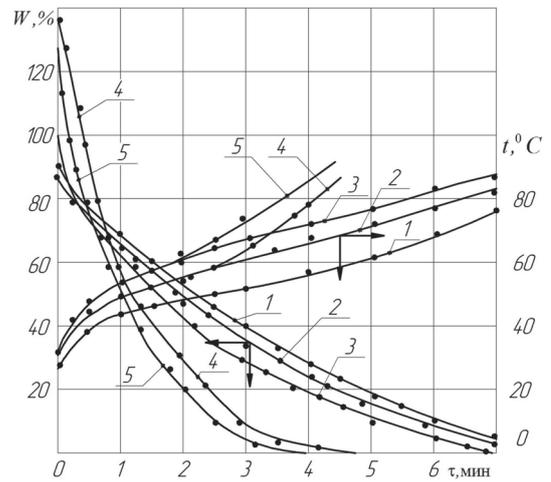


Рис. 1. Кривые сушки $W = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ для комбинированной сушки тканей при разных режимах: вискоза: 1 - $t_c = 80^\circ\text{C}$, $t_{изл} = 150^\circ\text{C}$, $v = 0,8$ м/с; 2 - $t_c = 100^\circ\text{C}$, $t_{изл} = 190^\circ\text{C}$, $v = 0,8$ м/с; 3 - $t_c = 120^\circ\text{C}$, $t_{изл} = 250^\circ\text{C}$, $v = 0,8$ м/с; лен: 4 - $t_c = 100^\circ\text{C}$, $t_{изл} = 190^\circ\text{C}$, $v = 1,2$ м/с; 5 - $t_c = 120^\circ\text{C}$, $t_{изл} = 250^\circ\text{C}$, $v = 1,2$ м/с

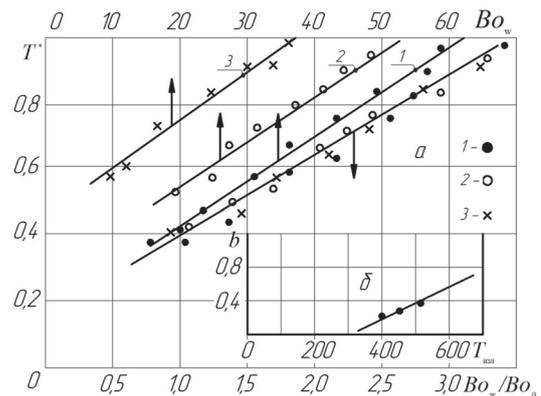


Рис. 2. Зависимости относительной температуры $T^* = f\left(\frac{Bo_W}{Bo_0}\right)$ и $T^* = f(Bo_W)$ (а) и коэффициента $b = f(T_{изл})$ в уравнении (15) (б) в процессе сушки тканей при режимах (рис. 1) и следующих отношениях: 1 - $T_{ом} / T_{изл} = 0,71$; 2 - $T_{ом} / T_{изл} = 0,65$; 3 - $T_{ом} / T_{изл} = 0,57$

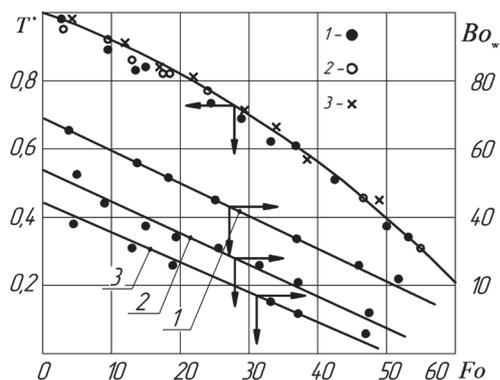


Рис. 3. Зависимость относительной температуры $T^* = f(Fo)$ и $Bo_W = f(Fo)$ для процесса сушки вискозной ткани при режимах: 1 - $t_c = 80^\circ C$, $t_{изл} = 150^\circ C$; 2 - $t_c = 100^\circ C$, $t_{изл} = 190^\circ C$; 3 - $t_c = 120^\circ C$, $t_{изл} = 250^\circ C$, скорость воздуха $v = 0,8$ м/с

Зависимость $T^* = f(Fo)$ для тканей из вискозы и льна при заданных режимах сушки, выражается уравнением

$$T^* = \exp(-0,013Fo). \quad (17)$$

Обработка экспериментов (рис. 3) показала сложный характер зависимости критерия Bo для влажного тела Bo_W от критерия Fo , отношения температур $T_{ом} / T_{изл}$ и критерия Bo для сухого тела Bo_0 .

Данные зависимости Bo_W можно выразить таким образом:

$$Bo_W = D - Fo, \quad (18)$$

$$D = C \frac{T_{ом}}{T_{изл}} + 25, \quad (19)$$

$$C = 5,5 Bo_0 - 37. \quad (20)$$

Критерий Bo_W является также функцией влагосодержания материала. Поэтому если известны достоверные значения теплофизических констант для влажного материала, то с достаточной точностью можно определить длительность сушки по критерию Bo_W .

Из решения уравнения (18) получим зависимость для определения времени сушки тканей

$$\tau = \frac{(D - Bo_W) \delta^2}{a}. \quad (21)$$

Более точно время сушки находится из решения зависимости (11):

$$\lg \bar{U} = \lg \frac{W - W_p}{W_0 - W_p} = f(\tau). \quad (22)$$

Зависимость $\lg \bar{U} = f(\tau)$ для процесса сушки тканей при различных режимах представлена на рис. 4. Обработкой эксперимента получено уравнение для определения времени сушки тканей:

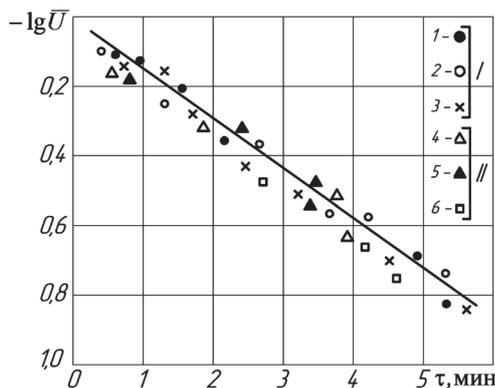


Рис. 4. Зависимость относительного влагосодержания $\lg \bar{U} = f(\tau)$ для процесса сушки тканей при различных режимах: I - вискоза: 1 - $t_c = 80^\circ C$, $t_{изл} = 150^\circ C$; 2 - $t_c = 100^\circ C$, $t_{изл} = 190^\circ C$; 3 - $t_c = 120^\circ C$, $t_{изл} = 250^\circ C$; II - лен: 4 - $t_c = 80^\circ C$, $t_{изл} = 150^\circ C$; 5 - $t_c = 100^\circ C$, $t_{изл} = 190^\circ C$; 6 - $t_c = 120^\circ C$, $t_{изл} = 250^\circ C$

$$\tau = -\frac{1}{k} \lg \frac{W - W_p}{W_0 - W_p}. \quad (23)$$

Коэффициент сушки k зависит от начального влагосодержания тканей и в интервале $W_0 \approx 85 - 135\%$ находится из следующего соотношения:

$$k = 5 \cdot 10^{-3} W_0 - 0,3. \quad (24)$$

Если воспользоваться зависимостью критерия $Bo_W = f(T_{изл}, W, \tau)$, то длительность процесса сушки можно вычислить таким образом:

$$\tau = \frac{B - Bo_W}{8}. \quad (25)$$

На рис. 5, а изображены зависимости $Bo_W = f(\tau)$ и $Bo_W = f(T_{ом} / T_{изл})$ для различных режимов сушки тканей, описываемые уравнением

$$\text{Bo}_W = B - 8\tau. \quad (26)$$

Коэффициент B определяется следующей формулой:

$$B = 176 \frac{T_{\text{ом}}}{T_{\text{изл}}} - 55. \quad (27)$$

Из уравнений (26) и (27) находится время сушки по зависимости (25).

Критерий Bo_W для влажного тела и плотность тепловых потоков $q_{\text{изл}}$ являются функциями влагосодержания W . Представляет интерес установить связь тепловых потоков $q_{\text{изл}}$ с критерием Bo_W и тем самым избежать определения коэффициентов теплообмена.

Для расчета теплообмена при терморрадиационной сушке тканей воспользуемся формулой излучения Стефана–Больцмана [1–3]:

$$q_{\text{изл}} = \epsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\frac{T_{\text{изл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \Phi \left(\frac{W}{W_{\text{кр}}} \right)^{0,5}, \quad (28)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Угловой коэффициент излучения Φ при принятом расположении материала от излучателей равен 1. Поправка $\left(W / W_{\text{кр}} \right)^{0,5}$ учитывает изменение тепловых потоков с уменьшением влагосодержания. Приведенная степень черноты системы определяется формулой (4).

Зависимость $\text{Bo}_W / \text{Bo}_0 = f(W)$ представлена на рис. 6. В результате обработки опытных данных получено уравнение

$$\text{Bo}_W = 1,43 \text{Bo}_0 \exp(0,013W). \quad (29)$$

Зависимости $\text{Bo}_W = f(W)$ и $q_{\text{изл}} = f(W)$ для процесса сушки технических тканей показаны на рис. 7. Зависимости $q_{\text{изл}} = f(W)$ представляют экспоненциальные кривые, выражаемые следующим уравнением:

$$q_{\text{изл}} = m \exp(0,014W). \quad (30)$$

Константа m зависит от отношения $T_{\text{ом}} / T_{\text{изл}}$ и вычисляется таким образом:

$$m = 10^3 \left(1,6 - 1,7 \frac{T_{\text{ом}}}{T_{\text{изл}}} \right).$$

Зависимость $\text{Bo}_W = f(W, t_c)$ выражается следующей формулой:

$$\text{Bo}_W = 0,19t_c + 0,5W. \quad (31)$$

При исследовании теплообмена при комбинированной сушке тканей тепловым излучением использовались также критериальные уравнения теплообмена с поправками на излучение [3]:

$$\text{Nu} = 0,87 \text{Re}^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_m} \right)^2 \left(\frac{T_{\text{изл}}}{T_c} \right)^{0,45} \left(\frac{W}{W_{\text{кр}}} \right)^{0,5}, \quad (32)$$

где $\text{Nu} = \bar{\alpha}l / \lambda_c$ – критерий Нуссельта; $\text{Re} = \nu l / \nu_c$ – критерий Рейнольдса; $T_c, T_{\text{изл}}$,

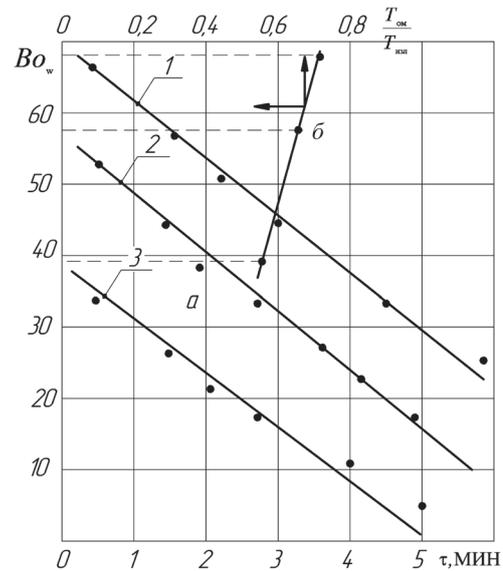


Рис. 5. Зависимости критерия $\text{Bo}_W = f(\tau)$ (а) и $\text{Bo}_W = f(T_{\text{ом}}/T_{\text{изл}})$ (б) в процессе сушки вискозы при различных режимах. Режимы сушки указаны на рис. 2

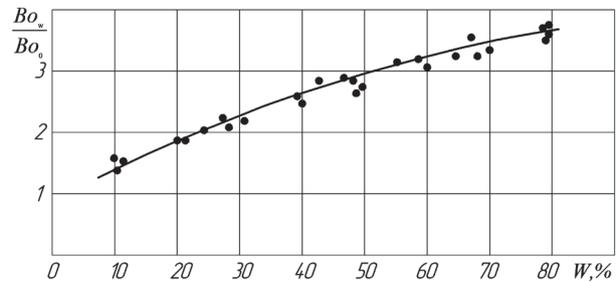


Рис. 6. Зависимость $\text{Bo}_W / \text{Bo}_0 = f(W)$ в процессе сушки тканей для всех режимов (рис. 1)

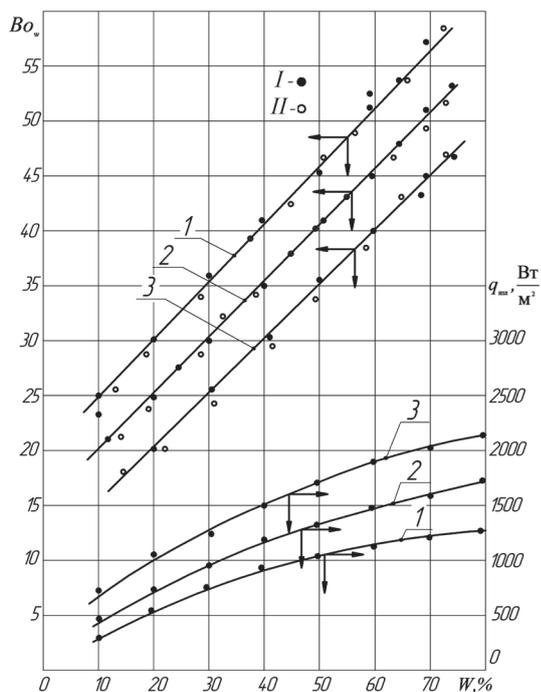


Рис. 7. Зависимости критерия Больцмана влажного материала $Bo_w = f(W)$ и плотности теплового потока $q_{изл} = f(W)$ при режимах, указанных на рис. 2: I – вискозная ткань; II – льняная ткань

T_M – соответственно абсолютные температуры среды, излучателя, мокрого термометра; $W_{кр}$, W – критическое и текущее влагосодержание материала; l – длина образца ткани по набеганию потока воздуха; λ_c , ν_c – теплопроводность и кинематическая вязкость среды (воздуха) воздуха; v – скорость набегающего потока.

Плотность потока тепла определялась по уравнению теплообмена

$$q = \bar{\alpha}(t_c - t_{п}), \quad (33)$$

где $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена; $t_{п}$ – температура поверхности материала.

В табл. 2 дано сравнение расчетных значений тепловых потоков по эмпирическим уравнениям, полученным при различных способах обработки экспериментальных данных.

Разброс значений по формулам (28), (30), (33) находится в пределах точности обработки опытных данных.

В стадии регулярного режима нагревания твердых тел для малоинтенсивных процессов теплообмена ($Bi < 1$) и неравномерности распределения температуры по объему материала $\psi \rightarrow 1$ темп нагревания тела m_t имеет вид [6]:

$$m_t = \frac{\bar{\alpha}}{c_W \rho_W R_V}. \quad (34)$$

Коэффициент неравномерности распределения температуры $\psi = t_c - t_{п} / t_c - \bar{t}$ характеризует отношение избыточной температуры по поверхности к избыточной температуре по объему. Коэффициент ψ при сушке тонких тканей уже с первых 10–15 с процесса принимал значения $\psi \rightarrow 1$. По данным табл. 1 и уравнению (32) вычислялся критерий $Bi = \bar{\alpha} R_V / \lambda_W$ для всех режимов сушки тканей. Значения критерия Bi , характеризующего условия переноса тепла внутри влажного тела, при всех режимах $Bi < 0,3$. В условиях $Bi < 1$ и значениях $\psi = 1$ происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объему. Выражение (34) при $\psi = 1$ можно записать в следующем виде [6]:

$$m_t = \frac{a}{R_V^2} Bi. \quad (35)$$

Таким образом, темп нагревания влажного тела m_t при заданной форме и $\psi = 1$ зависит только от теплофизических характеристик материала и интенсивности теплообмена поверхности

Т а б л и ц а 2. Сравнение расчетных значений тепловых потоков по эмпирическим уравнениям (28), (30), (33) для процесса сушки вискозной ткани при режиме: $t_c = 80^\circ\text{C}$, $t_{изл} = 150^\circ\text{C}$, $v = 0,8$ м/с

W , %	$\bar{\alpha}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ (32)	τ , мин (3)	q , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (28)	q , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (30)	q , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (33)
60	28,4	44	1090	960	1026
50	27,2	47	950	835	940
40	26,5	52	795	779	758
20	23,4	58	540	542	567
10	20,9	67	290	410	255

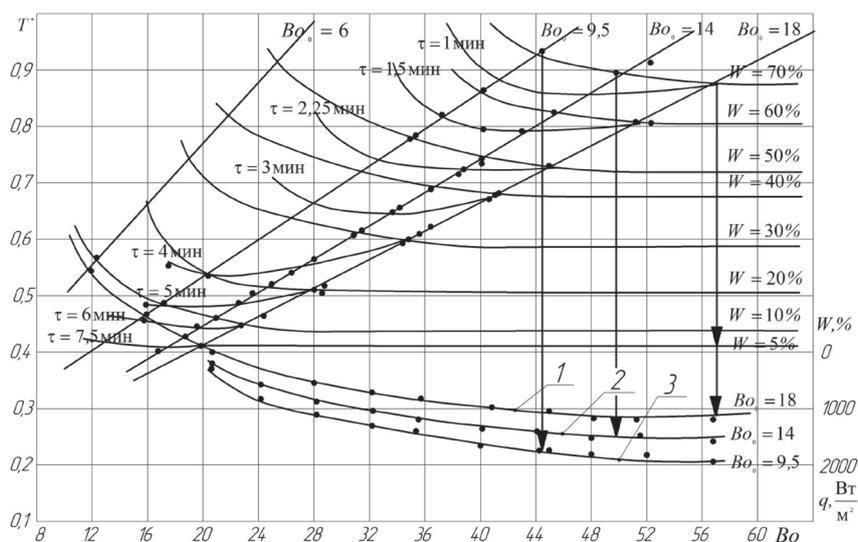


Рис. 8. Результаты расчета кинетики терморационной сушки технических тканей для исследуемых режимов: 1, 2, 3 – $T_{\text{ом}}/T_{\text{изл}} = 0,71; 0,65; 0,57$ соответственно

тела с внешней средой [6]. В стадии регулярного режима темп нагревания влажного тела оказывается величиной постоянной и не зависит от режима сушки.

Анализ экспериментальных данных по сушке тканей излучением на базе радиационного критерия Bo позволяет предложить метод расчета кинетики сушки тканей по графику, построенному на основе обработки экспериментов для всех режимов сушки. Расчетный график (рис. 8) строится в такой последовательности. По заданному режиму $T_{\text{изл}}$ и отношению $T_{\text{ом}}/T_{\text{изл}}$ определяется критерий Bo_0 для сухой ткани. Для каждого значения влагосодержания W находятся относительная температура материала T^* , интегральная температура \bar{t} и критерий для влажного тела Bo_W . При построении графика фиксируются точки пересечения значений Bo_0 с влагосодержанием W , затем строятся линии $Bo_0 = \text{const}$, $W = \text{const}$. Точки пересечения $Bo_0 = \text{const}$, $W = \text{const}$ определяют относительную температуру T^* и критерий Больцмана для влажной ткани Bo_W .

По значениям критерия для сухого тела Bo_0 для заданных режимов сушки по кривым процесса (рис. 1) строятся линии постоянного времени сушки τ при разных значениях влагосодержания. В нижней части графика рис. 8 наносятся зависимости плотности тепловых потоков $q = f(W, Bo_W)$.

Таким образом, все основные параметры кинетики сушки рассчитываются графически, что позволяет достаточно просто, точно и быстро проводить необходимые расчеты. График рис. 8 представляет расчетную номограмму.

Сопоставление численных величин параметров кинетики сушки для вискозы и льна, найденных графическим путем, с расчетными и экспериментальными значениями представлено в табл. 3, 4. Все значения параметров находятся в интервале возможной точности проведения эксперимента.

Таблица 3. Сравнение расчетных значений параметров кинетики сушки с экспериментом для процесса сушки вискозы при режиме: $T_{\text{изл}} = 423 \text{ K}$, $t_c = 80^\circ \text{C}$, $Bo_0 = 18$, $\frac{T_{\text{ом}}}{T_{\text{изл}}} = 0,71$

$W, \%$	$\tau, \text{ мин (21)}$	$\tau, \text{ мин (23)}$	$\tau, \text{ мин (25)}$	$\tau, \text{ мин экс}$	$\tau, \text{ мин (рис. 8)}$	$T^* \text{ экс (3)}$	$T^* (13)$	$Bo_W \text{ экс (6)}$	$T^* \text{ (рис. 8)}$	$t, ^\circ \text{C (15)}$	$t, ^\circ \text{C экс}$
80	0,57	0,51	0,5	0,5	0,5	0,25	0,22	67,6	0,22	34	35
60	1,38	1,34	1,6	1,55	1,6	0,37	0,35	56,2	0,36	43	44
40	3	2,85	3,15	3	3	0,44	0,45	45	0,47	46,5	46
20	4,56	4,72	4,35	4,74	4,4	0,53	0,54	35	0,57	54	53
10	6,2	6,4	6,5	6,2	5,7	0,64	0,63	28,4	0,66	58,5	58

Т а б л и ц а 4. Сравнение расчетных значений параметров кинетики сушки с экспериментом для процесса сушки льна при режиме: $T_{изл} = 463 \text{ К}$, $t_c = 100^\circ\text{С}$, $Bo_0 = 10$, $\frac{T_{ом}}{T_{из}} = 0,65$

W , %	τ , мин (21)	τ , мин (23)	τ , мин (25)	τ , мин экс	τ , мин (рис. 8)	T^* экс (3)	T^* (13)	Bo_{w} экс (6)	T^* (рис. 8)	t , $^\circ\text{С}$ (16)
80	0,77	0,75	0,74	0,8	0,34	0,38	41,5	0,38	47	46
60	1,15	1,12	1,14	1,12	0,35	0,41	38,1	0,4	48	48
40	1,75	1,69	1,7	1,65	0,41	0,49	28,7	0,45	52	52
20	2,27	2,8	2,25	2,25	0,51	0,58	22	0,59	61	60
10	2,82	3,3	2,87	2,85	0,63	0,63	18	0,67	70,4	71

Заключение. Исследование сушки тканей термоизлучением на основе радиационного критерия Больцмана позволяет предложить метод расчета основных параметров кинетики сушки тканей. В результате обработки и анализа опытных данных предложен графический метод определения основных кинетических характеристик процесса сушки тканей в заданном диапазоне изменения режимных параметров.

Расчетные зависимости, полученные обработкой эксперимента по сушке тканей, на основе радиационного критерия Больцмана имеют простой линейный характер, что значительно упрощает расчеты, экономит время и позволяет использовать данный метод расчета в инженерной практике.

Литература

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена М., 1979.
2. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л., 1968.
3. Лыков А. В. Теория сушки. М., 1973.
4. Колесников П. А. Теплозащитные свойства одежды. М., 1965.
5. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.; Л., 1963.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., 1967.

A. I. OLSHANSKY, V. I. OLSHANSKY, C. V. ZHERNOSEK

INVESTIGATION OF RADIATION-CONVECTIVE DRYING OF FABRIC WITH THE HELP OF CRITERIONS OF SIMILARITY OF THERMAL TRANSFER

Summary

Results of research of radiation convective drying of fabrics are stated. Dependences of criterion of Boltzmann for a damp body from key parameters of drying kinetics are established. The empirical equations for calculation of time of drying, temperatures of a material and thermal streams are given in the period of the decreasing speed. Methods of the theory of similarity of heat exchange and the theory of a regular thermal mode of heating of damp bodies were used during the processing of experimental data.