ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТОНКИХ ПЛОСКИХ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

HEAT AND MASS TRANSFER DURING CONVECTIVE DRYING OF THIN FLAT WET MATERIALS

УДК 66.047.1
https://doi.org/10.24411/2079-7958-2020-13808

А.И. Ольшанский*, А.А. Котов
Витебский государственный технологический университет

A. Alshanski*, A. Kotow
Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА, СКОРОСТЬ СУШКИ, ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА, ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСПАРЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООБМЕНА, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ЧИСЛО БИО

Изложена методика расчета конвективной сушки тонких материалов легкой промышленности на основе уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова и метода расчета сушки Б. С. Сажина. Приведена обработка экспериментальных данных по сушке шерстяного войлока, натуральной кожи и ткани. Даны уравнения для определения плотностей тепловых потоков, интенсивности испарения влаги, длительности сушки и температуры для периода падающей скорости. Вычислены значения коэффициента теплообмена и числа Био для второго периода сушки. Установлено, что при мягких режимах сушки и незначительных градиентах температуры по сечению тонкого тела число Био принимает значения меньше единицы, и основным лимитирующим фактором при сушке тонких материалов является внешний тепловлагообмен поверхности испарения с окружающей средой. Показано, что относительная скорость сушки определяется только влагосодержанием материала и не зависит от режима сушки. Дано сопоставление расчетных параметров сушки по приведенным формулам с опытными значениями. Несовпадение значений находится в допустимой зоне точности проведения эксперимента.

ABSTRACT

CONVECTIVE DRYING, DRYING SPEED, MOISTURE CONTENT, TEMPERATURE, RATE OF EVAPORATION, HEAT TRANSFER COEFFICIENT, HEAT CONDUCTION COEFFICIENT, THE BIO NUMBER

The method of calculating convective drying of light industry thin materials based on the A. V. Lykov's equation of drying kinetics and the B. S. Sazhin's calculating method of drying is described. Processing of experimental data on wool felt drying, natural leather drying and fabrics drying is presented. Equations for determining the densities of heat flows, the intensity of moisture evaporation, the duration of drying process, and the temperature for the period of falling velocity are given. The values of the heat transfer coefficient and the Bio number for the second drying period are calculated. It was found that under mild drying conditions and insignificant temperature gradients along the thin body cross-section, the Bio number takes values less than one, and the main limiting factor for drying thin materials is the external heat and humidity exchange of the evaporation surface with the environment. It is shown that the relative drying speed is determined only by the moisture content of the material and does not depend on the drying mode. The comparison of the calculated parameters of drying according to the given formulas with the experimental values is given. The mismatch of values is in the acceptable accuracy zone of the experiment.

* E-mail: *tiomp@vstu.by* (A. Alshanski)

ВВЕДЕНИЕ

Кинетикой принято называть изменение среднего влагосодержания и средней температуры материала в процессе сушки. В условиях протекания процесса при мягких режимах сушки весь процесс разделяют на периоды прогрева материала, постоянной скорости сушки (первый период) и падающей скорости (второй период). При сушке тонких материалов период прогрева очень мал по сравнению с длительностью сушки. Период постоянной скорости протекает при постоянной температуре мокрого термометра $t_м$. В большинстве случаев сушка при мягких режимах происходит и при постоянной температуре, равной $t_м$. Второй период начинается от критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ с возрастанием температуры от $t_м$ до температуры среды t_c при времени сушки $\tau \to \infty$.

Сушка ряда материалов может происходить сразу от начального влагосодержания $\bar{u}_0$ в периоде падающей скорости с непрерывным повышением температуры [1–3]. Сушка текстильных материалов после механического отжима также происходит в периоде падающей скорости [1–3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной задачей кинетики сушки является определение длительности сушки. Аналитический путь решения данной задачи очень сложен и не всегда возможен. В силу этих трудностей необходимо прибегать к экспериментальным исследованиям для разработки приближенных зависимостей для расчета кинетики сушки с минимальным числом постоянных, определяемых опытным путем [1, 3–5]. При этом более эффективными являются такие методы, которые основаны на наиболее общих закономерностях сушки и устойчивых комплексных переменных, характерных для процесса сушки. Выбор теплового режима, размер и тип сушильного аппарата существенно зависят от продолжительности сушки конкретного материала и решением этой задачи определяется эффективность работы установки, расход энергии на сушку и качество высушиваемого материала.

Целью исследования является разработка на основании уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова с использованием метода расчета кинетики Б. С. Сажина достаточно простой надежной методики расчета длительности сушки используемых в легкой промышленности тонких плоских влажных материалов, таких как натуральная кожа, ткань, войлок.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Основное уравнение кинетики сушки запишем в виде баланса тепла [1, 6]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{j_{II} \cdot r}{j_I \cdot r} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = N^*\left(1 + Rb\right), \quad (1)$$

где q_I, q_{II} – плотности потока тепла в первом и втором периодах сушки; j_I, j_{II} – интенсивность испарения влаги в первом и втором периодах сушки; r – теплота парообразования; $\bar{\alpha}_{кр}$, $\bar{\alpha}$ – коэффициенты теплообмена в первом и втором периодах сушки; Δt_I, Δt_{II} – разности температур в периодах сушки:

$$\Delta t_I = t_c - t_м,$$

$$\Delta t_{II} = t_c - \bar{t};$$

$\bar{t}$ – среднеинтегральная температура во втором периоде; N^* – относительная скорость сушки; Rb – число Ребиндера.

Путем обработки экспериментальных данных по сушке ряда различных материалов установлена обобщенная зависимость [6]

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = N^{*0,57}, \quad (2)$$

где $Nu_{кр}$, Nu – теплообменные критерии Нуссельта в первом и втором периодах сушки.

Уравнение (2) представим в виде

$$N^* = \left(\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}}\right)^{1,754}. \quad (3)$$

Экспериментальными исследованиями установлено [1, 3, 4, 6], что коэффициенты теплообмена $\bar{\alpha}$ во втором периоде сушки изменяются с уменьшением влагосодержания материала по эмпирической зависимости [1, 4, 6]

$$\frac{\overline{\alpha}}{\overline{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{n}, \qquad (4)$$

где $\overline{u}$ и $\overline{u}_{кр}$ – текущее и критическое влагосодержание материала, соответствующее переходу от первого периода сушки ко второму. Постоянная n зависит от вида влажного материала и не зависит от режима сушки.

На основании зависимости (4) и уравнения (1) запишем для тепловых потоков

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \left(\frac{\overline{\alpha}}{\overline{\alpha}_{кр}}\right)^{1,754} = \left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{1,754\cdot n}. \qquad (5)$$

Плотность потока тепла в первом периоде сушки определяется по уравнению

$$q_I = r\rho_0 R_V N, \qquad (6)$$

где ρ_0 – плотность сухого материала, $R_V = V/F = \delta$ – толщина материала, определяемая как отношение объема тела к площади его поверхности, N – скорость сушки в первом периоде. Тогда из уравнений (5) и (6) плотность потока тепла во втором периоде сушки

$$q_{II} = q_I\left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{1,754\cdot n} = r\rho_0 R_V N\left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{1,754\cdot n}. \qquad (7)$$

Расход тепла на нагревание тонкого влажного материала значительно меньше расхода тепла на испарение из него влаги ($c_{вл} \cdot \Delta t << r$, где $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного материала) и для таких тел число Ребиндера $Rb << 1$ [1, 6, 7].

В реальных условиях сушки тонких материалов при $\overline{u} \to u_p$, где u_p – равновесное влагосодержание материала, числа $Rb \approx 0{,}1–0{,}25$. При малых величинах числа Rb его значениями можно пренебречь.

Из уравнения баланса тепла (1) определяется интенсивность испарения влаги во втором периоде сушки

$$\frac{j_{II}}{j_I} = \left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{1,754\cdot n};$$

$$j_{II} = j_I\left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right) = \rho_0 R_V N\left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{1,754\cdot n}, \qquad (8)$$

где $\rho_0 R_V N$ – интенсивность испарения влаги в первом периоде сушки.

Температуру материала во втором периоде сушки можно определить из уравнения (1). Запишем, при $Rb = 0$

$$\frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \frac{t_c - \overline{t}}{t_c - t_м} = N^*\left(\frac{\overline{\alpha}}{\overline{\alpha}_{кр}}\right)^{-1}. \qquad (9)$$

Подставляя N^* из уравнения (3), с учетом (4) получим

$$\frac{t_c - \overline{t}}{t_c - t_м} = \left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{0,754\cdot n}. \qquad (10)$$

Среднеинтегральная температура во втором периоде сушки

$$\overline{t} = t_c - (t_c - t_м)\cdot\left(\frac{\overline{u}}{\overline{u}_{кр}}\right)^{0,754\cdot n}. \qquad (11)$$

Для материалов, сушка которых происходит в периоде падающей скорости, отношение влагосодержаний ($\overline{u}/\overline{u}_{кр}$) необходимо заменить на отношение ($\overline{u}/\overline{u}_0$).

Температуру материала во втором периоде можно вычислить по уравнению [7]

$$\overline{t} = t_c - (t_c - t_м)\cdot\exp(-m_t\cdot\tau_{II}), \qquad (12)$$

где m_t – темп нагрева.

Длительность сушки во втором периоде τ_{II} определяется по формуле [3]

$$\tau_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{\overline{u}_{кр} - u_p}{\overline{u} - u_p} \quad , \qquad (13)$$

где K – эффективный коэффициент скорости сушки.

Темп нагрева тонкого влажного материала m_t при малых значениях числа Био Bi < 1 равен [8, 14]

$$m_t = \frac{\overline{\alpha}}{c_{вл} \cdot \rho_0 \cdot R_V} \quad .$$

Темп нагрева m_t определяется из опыта путем измерения температуры в любой точке тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима [7, 8, 14]

$$m_t = \frac{\ln \frac{t_c - t_1}{t_c - t_2}}{\tau_2 - \tau_1} \quad .$$

Б. С. Сажиным в основу расчета кинетики сушки положено обобщенное уравнение массопередачи [4, 9]

$$\left| \frac{d\overline{u}}{d\tau} \right| = K\left(\overline{u}_{пр} - \overline{u}\right) \cdot \left(\overline{u} - u_p\right) \quad , \qquad (14)$$

где $d\overline{u}/d\tau$ – скорость сушки; $\overline{u}_{пр}$ – влагосодержание, достигаемое материалом в стадии прогревания.

Интегрированием (14) от начального влагосодержания $\overline{u}_0$ с учетом влагосодержания $\overline{u}_{пр}$ получим длительность сушки до любого заданного значения текущего влагосодержания [9]

$$\tau = \frac{\overline{u}_0}{K\left(\overline{u}_0 - u_p\right)} \cdot Z \quad . \qquad (15)$$

Параметр Z определяется выражением [9]

$$Z = \ln \frac{\left(\overline{u}_0 - \overline{u}\right) \cdot \left(\overline{u}_{пр} - u_p\right)}{\left(\overline{u}_0 - \overline{u}_{пр}\right) \cdot \left(\overline{u} - u_p\right)} \quad . \qquad (16)$$

В системе координат $Z = f(\tau)$ кривые кинетики представляют собой прямые, угол наклона которых определяет скорость сушки K, а отрезки, отсекаемые по оси Z при $\overline{u} = u_p$, равны $Z_0 = \overline{u}_{пр}$, определяемые по уравнению (15).

На рисунках 1, 2 и 3 изображены кривые сушки $\overline{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\overline{t} = f(\tau)$ для одного из режимов сушки шерстяного войлока, стелечного полувала (натуральная кожа) и тонкой ткани. Кривые сушки для кожи и ткани взяты из [10, 11]. Значения режимов сушки соответствуют обозначениям, приведенным в таблице 1.

Обработка кривых кинетики сушки $Z = f(\tau)$, представленных на рисунках 1, 2 и 3 (*б*), дает простое уравнение длительности процесса сушки

$$\tau = \frac{1}{K}\left(Z - Z_0\right) \quad . \qquad (17)$$

Величина Z_0 определяется по (15) при значении $\overline{u} = \overline{u}_{пр}$.

Скорость сушки влажного материала $d\overline{u}/d\tau$ в общем случае определяется двумя механизмами переноса: механизмом тепломассообмена между поверхностью испарения тела и внешней средой (внешний перенос) и механизмом тепломассопереноса внутри самого тела (внутренний перенос) [4, 9, 12].

При низкой интенсивности внешнего тепловлагообмена при сушке тонких материалов при малых градиентах температуры теплообменный критерий Bi << 1. Лимитирующим фактором, определяющим интенсивность тепловлагообмена, является взаимодействие поверхности испарения с внешней средой [4, 7, 9]. При этом в реальных условиях сушки тепловлагообменные критерии Bi и Bi_m оказываются приблизительно одинаковыми [13]. В этих условиях внутренний перенос слабо влияет на скорость сушки [4, 8, 14].

В результате обработки большого числа экспериментальных данных по сушке различных материалов была получена формула для теплообменного критерия Нуссельта [1, 6, 7, 15]

Таблица 1 – Режимные параметры конвективной сушки войлока, стелечного полувала и шерстяной ткани

Показатели / Режимы	t_c, °C	υ, м/с	φ, %	u_p	$t_м$, °C	$\bar{u}_{кр}$	$N \cdot 10^{-3}$, c^{-1}
Шерстяной войлок (рисунок 1)							
1	90	5	5	0,02	38	0,75	0,84
2	120	3	5	0,02	40	0,75	1,03
3	120	5	5	0,01	42	0,72	1,22
Стелечный полувал (рисунок 2)							
1	40	1	60	0,16	33	0,66	0,095
2	60	1	45	0,145	36	0,8	0,118
3	40	1	40	0,15	35	0,65	0,19
Шерстяная тонкая ткань (рисунок 3)							
1	90	5,3	6	0,02	40	–	11,2
2	90	2,8	5	0,015	39	–	9,5
3	87	0,9	4	0,062	35	–	5,5
4	63	5,6	25	0,04	39	–	6,5
5	50	5,6	30	0,045	30	–	4,5

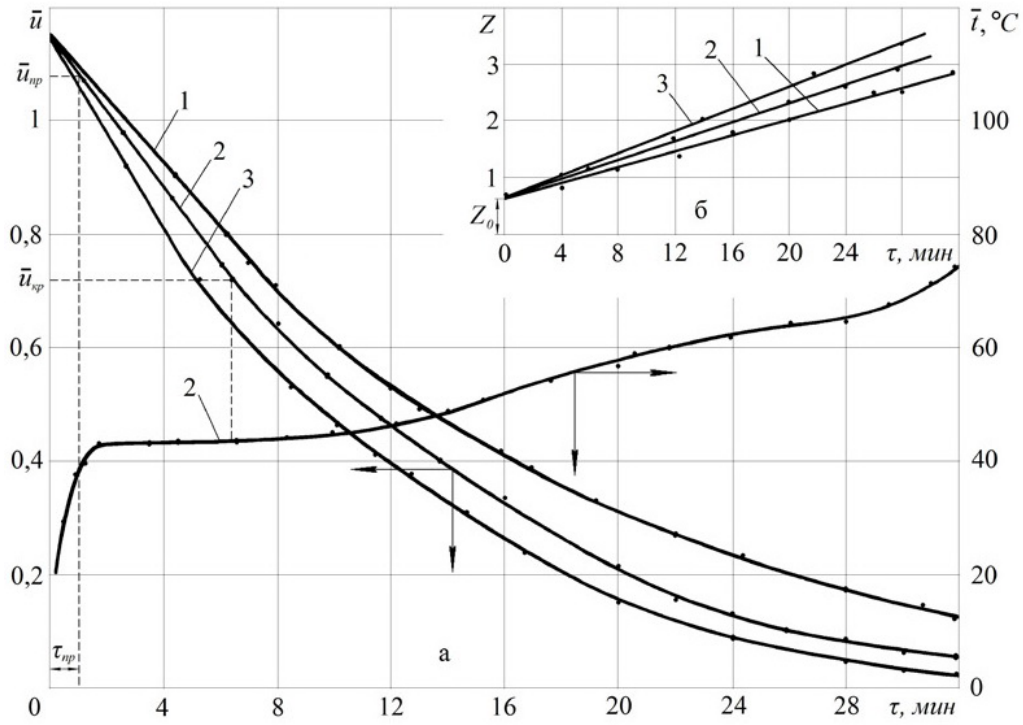

Рисунок 1 – Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ для режима сушки № 2 в процессе конвективной сушки шерстяного войлока (а) и зависимость параметра $Z = f(\tau)$ (б). Режимы сушки указаны в таблице 1

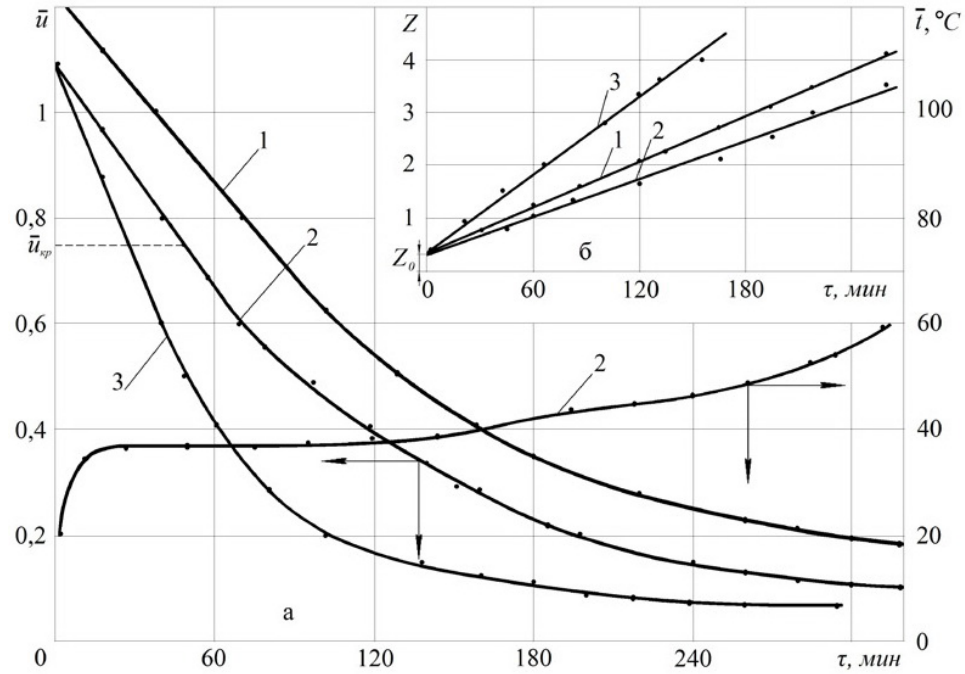

Рисунок 2 – Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ для режима сушки № 2 в процессе конвективной сушки стелечного полувала (а) и зависимость параметра $Z = f(\tau)$ (б). Режимы сушки указаны в таблице 1

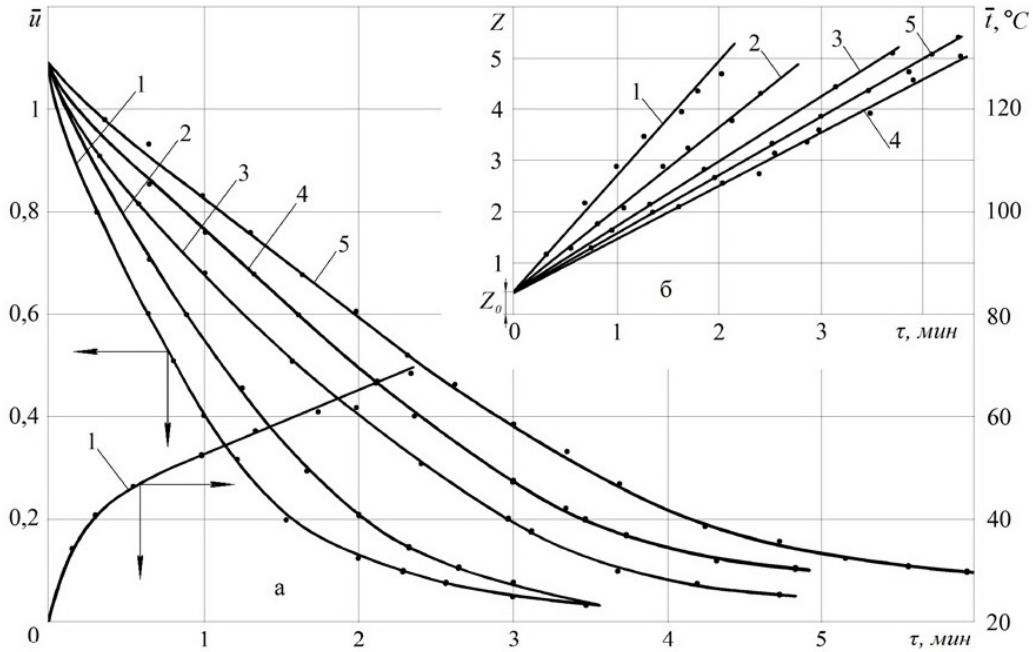

Рисунок 3 – Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ для режима сушки № 1 в процессе конвективной сушки ткани (а) и зависимость параметра $Z = f(\tau)$ (б). Режимы сушки указаны в таблице 1

$$Nu = A \cdot Re^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_м}\right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^n, \quad (18)$$

где $\boldsymbol{Nu}$ и $\boldsymbol{Re}$ – критерии Нуссельта и Рейнольдса; $\boldsymbol{T_c}$, $\boldsymbol{T_м}$ – абсолютные температуры среды и мокрого термометра.

Установлены значения коэффициента $\boldsymbol{A}$ и постоянной $\boldsymbol{n}$ в уравнении (18) [1, 6, 14, 15]: для шерстяного войлока $\boldsymbol{A}$ = 0,435, $\boldsymbol{n}$ = 0,5; для натуральной кожи $\boldsymbol{A}$ = 0,9, $\boldsymbol{n}$ = 0,65; для тканей $\boldsymbol{A}$ = 0,89, $\boldsymbol{n}$ = 0,42.

На рисунке 4 представлены зависимости $\boldsymbol{lg\ \bar{a}/\bar{a}_{кр} = f\ (lg\ \bar{u}/\bar{u}_{кр})}$ для конвективной сушки тканей, натуральной кожи и шерстяного войлока [1, 6, 15].

Значения коэффициента теплообмена $\bar{\boldsymbol{a}}$, вычисленные по уравнению (18) и критерию Нуссельта

$$\bar{\alpha} = \frac{Nu \cdot \lambda_{воз.}}{l},$$

где $\lambda_{воз.}$ – коэффициент теплопроводности воздуха; $\boldsymbol{l}$ – длина образца материала по направлению потока воздуха, даны в таблице 2.

Число Био

$$Bi = \frac{\bar{\alpha} \cdot \delta}{\lambda_{вл.}}, \quad (19)$$

где $\lambda_{вл.}$ – коэффициент теплопроводности влажного материала. За определяющий размер влажного тела принимается толщина материала $\boldsymbol{\delta}$. Значения числа $\boldsymbol{Bi}$, вычисленные по (19), приведены в таблице 2.

Следует отметить, что в решениях дифференциальных уравнений тепломассопереноса для неограниченной пластины в краевых условиях третьего рода (сушка) за определяющий размер принимается половина толщины пластины, а начало координат помещается в центральной плоскости пластины. Следовательно, значения

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta/2}{\lambda_{вл.}}$$

будут значительно меньше.

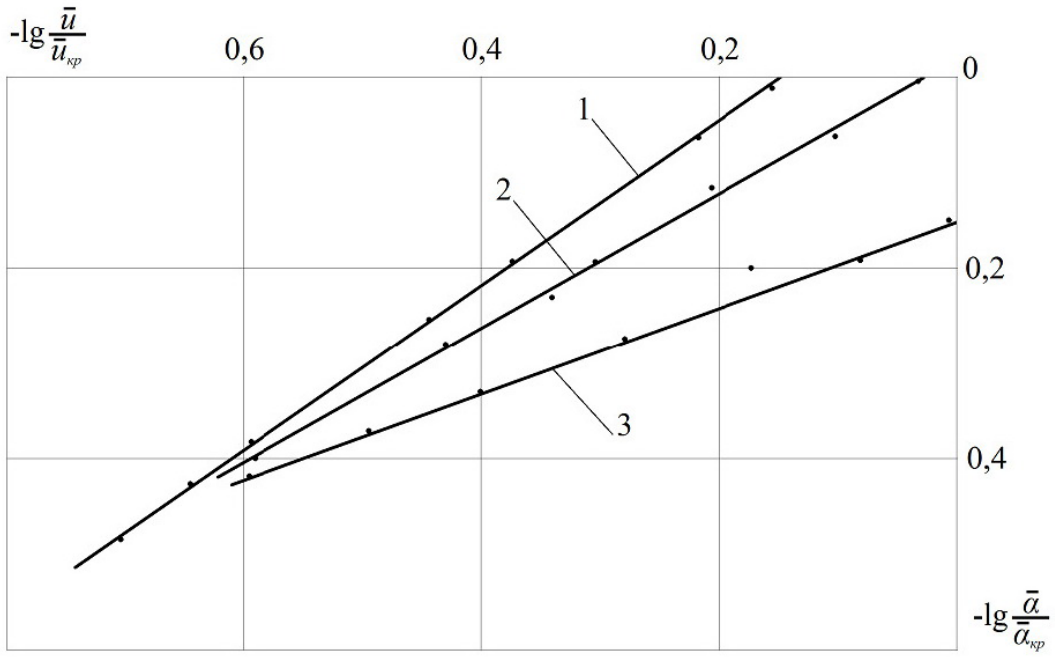

Рисунок 4 – Зависимость $\boldsymbol{lg\ \bar{a}/\bar{a}_{кр} = f\ (lg\ \bar{u}/\bar{u}_{кр})}$ *в процессе конвективной сушки материалов при разных режимах сушки: 1 – ткани, 2 – натуральная кожа, 3 – шерстяной войлок*

Таблица 2 – Численные значения параметров кинетики конвективной сушки войлока, стелечного полувала, ткани и сопоставление полученных данных с экспериментом

$\bar{u}$	a, Вт/м² • град (18)	$\lambda_{вл.}$, Вт/м • град (20)	Bi (19)	q, Вт/м² (7)	$j_{II} \cdot 10^3$, кг/м² • с (8)	τ, мин экс.	τ, мин (15)	τ_{II}, мин экс.	τ_{II}, мин (13)	$\bar{t}$, °С экс.	$\bar{t}$, °С (11)	$\bar{t}$, °С (12)
Шерстяной войлок, пластина 200×150×6 мм; ρ_0 = 160 кг/м³; λ_0 = 0,052 Вт/м • град. Режим сушки: t_c = 120 °С; v = 3 м/с; φ = 5 %; $\bar{u}_0$ = 1,14; $\bar{u}_{кр}$ = 0,75; N = 0,96 • 10⁻³ с⁻¹; $t_м$ = 42 °С; $\bar{a}_{кр}$ = 30,2 Вт/м² • град; τ_I = 6 мин; q_I = 2210 Вт/м²; j_I =0,92 • 10⁻³ кг/м² • с; m_t = 0,022 мин⁻¹; K = 0,014 мин⁻¹ (режим сушки № 2)												
0,7	29,2	0,278	0,64	2080	0,866	6,5	6,3	1,0	0,92	44	45	44,0
0,6	26,7	0,237	0,67	1817	0,756	8,2	8,2	2,5	2,9	45	45,5	46,4
0,5	23,6	0,212	0,66	1549	0,644	11,0	10,6	5,0	5,2	48	49	50,0
0,4	17,8	0,176	0,62	1273	0,531	14,0	13,5	8,0	8,2	50	52	52,5
0,3	12,6	0,142	0,59	989	0,412	17,0	17,2	11,5	11,9	57	58	60,5
0,2	10,7	0,114	0,61	694	0,288	21,5	22,4	16,5	17,2	62	63	64,5
0,1	8,6	0,084	0,63	378	0,157	29,5	31,3	20,5	23,5	64	65	68,0
Стелечный полувал, пластина 200×150×2,8 мм; ρ_0 = 585 кг/м³; λ_0 = 0,121 Вт/м • град. Режим сушки: t_c = 60 °С; v = 1 м/с; φ = 60 %; $\bar{u}_0$ = 1,34; $\bar{u}_{кр}$ = 0,8; $\bar{u}_p$ = 0,145; N = 0,12 • 10⁻³ с⁻¹; $t_м$ = 35 °С; $\bar{a}_{кр}$ = 18,8 Вт/м² • град; q_I = 473 Вт/м²; j_I =0,197 • 10⁻³ кг/м² • с; m_t = 1,145 • 10⁻³ мин⁻¹; K = 0,025 мин⁻¹ (режим сушки № 2)												
0,7	16,8	0,227	0,21	407	0,17	57	58	17	16,3	36	36,5	35,6
0,6	15,6	0,196	0,192	341	0,14	68	69	28	29,5	37	37,0	36,5
0,5	13,2	0,192	0,20	277	0,11	92	94	52	51,1	38	37,5	37,6
0,4	11,2	0,165	0,185	216	0,09	120	121	81	78,8	39	38,5	38,3
0,3	9,5	0,154	0,177	155	0,06	158	159	119	120	40	39,5	39,2
0,25	8,3	0,147	0,158	126	0,05	178	180	145	152	41	41,5	40,6
Шерстяная ткань, толщина δ = 0,4 • 10⁻³ м; ρ_0 = 100 кг/м³; λ_0 = 0,046 Вт/м • град. Режим сушки: t_c = 90,5 °С; v = 5,3 м/с; φ = 6 %; $\bar{u}_0$ = 1,1; $\bar{u}_{кр}$ = 1,1; $\bar{u}_p$ = 0,025; N = 11,2 • 10⁻³ с⁻¹; $t_м$ = 40 °С; $\bar{a}_{макс}$ = 25,3 Вт/м² • град; q_I = 1075 Вт/м²; j_I =0,45 • 10⁻³ кг/м² • с; m_t = 3,5 • 10⁻³ мин⁻¹; K = 2,52 мин⁻¹ (режим сушки № 1)												
0,8	18,4	0,238	0,031	860	0,35	0,35	0,37	–	–	40	42	43,0
0,7	16,2	0,214	0,030	770	0,33	0,50	0,52	–	–	45	44	45,8
0,6	14,8	0,190	0,029	688	0,29	0,67	0,68	–	–	47	46	46,2
0,5	13,6	0,167	0,028	602	0,26	0,83	0,84	–	–	50	48	48,7
0,4	11,8	0,142	0,027	510	0,22	1,00	1,00	–	–	51	50	49,4
0,3	8,7	0,119	0,024	413	0,18	1,27	1,30	–	–	54	54	52,6
0,2	6,8	0,096	0,021	310	0,13	1,60	1,63	–	–	56	57	55,7
0,1	5,3	0,072	0,018	184	0,08	2,43	2,37	–	–	65	62	61,5

В процессах термической обработки и тепломассообменных процессах сушки важное значение приобретают исследования по изучению изменения коэффициента теплопроводности в зависимости от влагосодержания и температуры. Установлено, что в общем случае с повышением температуры и влагосодержания материалов коэффициент теплопроводности возрастает [1, 4, 8, 16].

Основным требованием для получения более точных значений $\lambda_{вл.}$ является кратковременность теплового воздействия на влажный мате-

риал в эксперименте [8].

В результате изучения и анализа ряда источников [8, 11, 14, 16–19] с возможной точностью установлены закономерности изменения $\lambda_{вл.} = f\ (\bar{t}, \bar{u})$ для исследуемых материалов. При обработке опытных данных за основу была принята формула В. И. Дубницкого [1, 8].

$$\lambda_{вл.} = \lambda_0 + A \cdot \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot \exp(B \cdot \bar{u}) \quad , \qquad (20)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого материала.

В результате установлены приближенные за-

*Таблица 3 – Значение параметра **Z** по формуле (16) и сравнение длительности сушки по уравнению (15) с экспериментом в процессах сушки войлока, натуральной кожи и ткани*

$\bar{u}$	Z (16)	τ, мин (15)	τ, мин экс.	Z (16)	τ, мин (15)	τ, мин экс.	Z (16)	τ, мин (15)	τ, мин экс.
	Шерстяной войлок, пластина 200×150×6 мм								
	Режим сушки № 1 $\bar{u}_{пр}$ = 1,0; K = 0,13 мин$^{-1}$			Режим сушки № 2 $\bar{u}_{пр}$ = 0,99; K = 0,14 мин$^{-1}$			Режим сушки № 3 $\bar{u}_{пр}$ = 0,98; K = 0,096 мин$^{-1}$		
0,6	1,35	10,0	10,5	1,20	8,2	8,2	1,17	12,3	12
0,5	1,57	12.2	12,0	1,57	11,3	11,0	1,45	15,2	15
0,4	2,23	17,2	17,0	2,00	14,5	14,0	1,84	19,4	19
0,3	2,75	21,2	20,5	2,40	17,2	17,0	2,33	24,6	24
0,2	3,39	26,1	26,0	3,00	22,4	21,5	3,15	32,8	31
0,1	4,62	35,6	35,5	4,43	31,3	29,5	3,46	36,3	34
	Натуральная кожа – стелечный полувал, пластина 200×150×2,8 мм								
	Режим сушки № 1 $\bar{u}_{пр}$ = 1,04; K = 0,22 мин$^{-1}$			Режим сушки № 2 $\bar{u}_{пр}$ = 0,995; K = 0,025 мин$^{-1}$			Режим сушки № 3 $\bar{u}_{пр}$ = 1,03; K = 0,034 мин$^{-1}$		
0,9	1,06	55,2	53	0,72	33,0	32	0,56	18,9	18
0,7	1,73	90,5	90	1,25	57,3	57	1,05	35,5	35
0,6	2,20	114,6	112	1,49	68,4	68	1,26	42,5	42
0,5	2,62	137,0	136	2,00	91,6	92	1,60	53,6	50
0,4	3,18	165,8	165	2,68	122,7	120	1,81	61,9	60
0,3	3,85	201,0	202	3,46	158,5	158	2,42	81,6	80
0,25	4,70	245,3	243	3,92	180,5	178	2,75	92,8	92
	Тонкая шерстяная ткань, толщина δ = 0,4 • 10^{-3} м; ρ_0 = 100 кг/м^3								
	Режим сушки № 1 $\bar{u}_{пр}$ = 1,05; K = 2,52 мин$^{-1}$			Режим сушки № 2 $\bar{u}_{пр}$ = 1,04; K = 1,68 мин$^{-1}$			Режим сушки № 3 $\bar{u}_{пр}$ = 1,02; K = 1,56 мин$^{-1}$		
0,8	0,85	0,362	0,350	0,84	0,510	0,500	0,99	0,648	0,667
0,7	1,19	0,507	0,500	1,12	0,680	0,667	1,55	1,013	1,000
0,6	1,62	0,688	0,667	1,55	0,942	0,933	2,13	1,390	1,333
0,5	1,97	0,837	0,833	1,95	1,182	1,167	2,53	1,663	1,633
0,4	2,39	1,013	1,000	2,27	1,378	1,367	3,13	2,045	2,000
0,3	3,05	1,297	1,267	2,77	1,682	1,667	3,90	2,547	2,500
0,2	3,87	1,645	1,633	3,46	2,097	2,067	4,60	3,017	3,000
0,1	5,54	2,388	2,433	4,52	2,742	2,700	6,00	3,917	3,883

висимости $\lambda_{вл.} = f(\bar{t}, \bar{u})$ для войлока, кожи и тканей.

Для шерстяного войлока

$$\lambda_{вл.} = 0{,}053 + 2{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot \exp(-2 \cdot \bar{u})\ Вт/м \cdot град$$

Для натуральной кожи

$$\lambda_{вл.} = 0{,}121 + 1{,}31 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot \exp(1{,}8 \cdot \bar{u})\ Вт/м \cdot град$$

Влияние температуры и влажности тканей на $\lambda_{вл.} = f(\bar{t}, \bar{u})$ хорошо изучено [5, 16].

Для шерстяных тканей

$$\lambda_{вл.} = \lambda_0 + 0{,}0026 \cdot W,$$

для хлопчатобумажных тканей

$$\lambda_{вл.} = \lambda_0 + 0{,}0039 \cdot W,$$

где $\lambda_0 \approx 0{,}046$ $Вт/м \cdot град$ – теплопроводность сухих тканей; W – влагосодержание ткани, %.

Влиянием температуры на изменение $\lambda_{вл.}$ в пределах до 80 °C можно пренебречь [16].

Результаты расчетов кинетики сушки по полученным уравнениям для процессов сушки исследуемых материалов представлены в таблицах 2 и 3 и дано сопоставление расчетных значений с экспериментальными. Погрешность в разбросе значений параметров находится в пределах точности обработки опытных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова совместно с методом расчета кинетики Б. С. Сажина позволяет полностью определить все основные кинетические характеристики тепловлагообмена. Значения параметров, вычисленные по формулам, хорошо согласуются с экспериментом.

Использование полученных уравнений в инженерной практике позволит значительно сократить число трудоемких и сложных экспериментов и объем расчетной работы при обработке опытных данных, необходимых для обоснованного и правильного выбора сушильного оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А. В. (1968), *Теория сушки*, Москва, 472 с.
2. Натареев, О. С., Кокина, Н. Р., Натареев, С. В. (2015), Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала, *Известия вузов, Химия и химическая технология*, 2015, № 2, С. 65–70.
3. Рудобашта, С. П. (2015), *Теплотехника*, Москва, 672 с.
4. Акулич, П. В. (2010), *Расчеты сушильных и теплообменных установок*, Минск, 443 с.
5. Балыхин, М. Г., Разумеев, К. Э., Кошелева, М. К., Захарова, А. А. (2015), Процессы сушки и тер-

REFERENCES

1. Lykov, A. V. (1968), *Teorija sushki* [Drying theory], Moscow, 472 p.
2. Natareev, O. S., Kokina, N. R., Natareev, S. V. (2015), Heat transfer in the process convective drying of wet material [Teploperenos v processe konvektivnoj sushki vlazhnogo materiala], *Izvestija vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija – News of institutes of higher education. Chemistry and chemical technology*, 2015, № 2, pp. 65–70.
3. Rudobashta, S. P. (2015), *Teplotekhnika* [Heat engineering], Moscow, 672 p.
4. Akulich, P. V. (2010), *Raschety sushil'nykh i teploobmennykh ustanovok* [Calculations of drying and heat exchange units], Minsk, 443 p.

мовлажностной обработки в текстильной и легкой промышленности, Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе, *Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений*, Москва, 2015, С. 193–204.

6. Лыков, А. В., Куц, П. С., Ольшанский, А. И. (1972), Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов, *Инженерно-физический журнал*, 1972, Т. 23, № 3, С. 401–406.

7. Ольшанский, А. И., Гусаров, А. М. (2017), Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких, плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных, *Инженерно-физический журнал*, 2017, Т. 90, № 3, С. 700–713.

8. Васильев, В. Н., Куцакова, В. Е., Фролов, С. В. (2013), *Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса*, Санкт-Петербург, 224 с.

9. Сажин, Б. С., Сажин, В. Б. (1997), *Научные основы техники сушки*, Москва, 447 с.

10. Филоненко, Г. К., Лебедев, П. Д. (1952), *Сушильные установки*, Москва – Ленинград, 262 с.

11. Лыков, А. В. (1938), *Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения*, Москва, 776 с.

12. Кошелева, М. К., Рудобашта, С. П. (2015), Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов, Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе, *Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений*, Москва, 2015, С. 205–210.

13. Лыков, А. В., Михайлов, Ю. А. (1963), *Теория тепло- и массопереноса*, Москва – Ленинград, 536 с.

5. Balyhin, M. G., Razumeev, K. E., Kosheleva, M. K., Zakharova, A. A. (2015), The processes of drying and hygrothermal processing in the textile and light indutry [Processy sushki i termovlazhnostnoj obrabotki v tekstil'noj i ljogkoj promyshlennosti], Actual problems of drying and thermal-humidification processing of materials in various industries and agricultural complex, *Collection of scientific articles of the First International Lykov scientific readings*, Moscow, 2015, pp. 193–204.

6. Lykov, A. V., Kuts, P. S., Olshansky, A. I. (1972), The kinetics of heat transfer during the drying process of wet materials [Kinetika teploobmena v processe sushki vlazhnyh materialov], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Journal of Engineering Physics*, 1972, V. 23, № 3, pp. 401–406.

7. Olshansky, A. I., Gusarov, A. M. (2017), Experimental study of the kinetics of drying thin, flat wet materials by regular mode method using generalized complex variables [Eksperimental'noe issledovanie kinetiki sushki tonkih, ploskih vlazhnyh materialov metodom regulyarnogo rezhima s ispol'zovaniem obobshhennyh kompleksnyh peremennyh], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Journal of Engineering Physics*, 2017, V. 90, № 3, pp. 700–713.

8. Vasilyev, V. N., Kutsakova, V. E., Frolov, S. V. (2013), *Technologija sushki. Osnovy teplo- i massoperenosa* [Drying technology. Basics of heat and mass transfer]. Saint-Petersburg, 224 p.

9. Sazhin, B. S., Sazhin, V. B. (1997), *Nauchnye osnovy tehniki sushki* [Scientific basis of drying techniques], Moscow, 447 p.

10. Filonenko, G. K., Lebedev, P. D. (1952), *Sushil'nye ustanovki* [Drying units], Moscow – Leningrad, 262 p.

11. Lykov, A. V. (1938), *Kinetika i dinamika processov sushki i uvlazhneniya* [Kinetics and dynamics of drying and humidification processes], Moscow,

14. Кавказов, Ю. Л. (1973), *Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви*, Москва, 272 с.

15. Ольшанский, А. И., Климентьев, А. Л., Петренко, В. В. (2018), Исследование кинетики конвективной сушки натуральных кож, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2018, № 1 (34), С. 49–62.

16. Колесников, П. А. (1965), *Теплозащитные свойства одежды*, Москва, 345 с.

17. Франчук, А. У. (1969), *Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов*, Москва, 143 с.

18. Григорьев, И. С. (1991), *Физические величины. Справочник*, Москва, 1232 с.

19. Блэзи, В. (2012), *Справочник проектировщика. Строительная физика*, Москва, 616 с.

776 p.

12. Kosheleva, M. K., Rudobashta, S. P. (2015), The features of the drying process of nonwoven textile materials [Osobennosti processa sushki netkanyh tekstil'nyh materialov], Actual problems of drying and thermal-humidification processing of materials in various industries and agricultural complex, *Collection of scientific articles of the First International Lykov scientific readings*, Moscow, 2015, pp. 205–210.

13. Lykov, A. V., Mikhailov, Yu. A. (1963), *Teoriya teplo- i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer], Moscow – Leningrad, 536 p.

14. Kavkazov, Yu. L. (1973), *Teplo- i massoobmen v tehnologii kozhi i obuvi* [Heat and mass transfer in the technology of leather and shoes], Moscow, 272 p.

15. Olshansky, A. I., Klimentyev, A. L., Petrenko, V. V. (2018), Examination of kinetics of natural leathers convective drying [Issledovanie kinetiki konvektivnoj sushki natural'nyh kozh], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University,* 2018, № 1 (34), pp. 49–62.

16. Kolesnikov, P. A. (1965), *Teplozashhitnye svojstva odezhdy* [Thermal protection properties of clothing], Moscow, 345 p.

17. Franchuk, A. U. (1969), *Tablicy teplotehnicheskih pokazatelej stroitel'nyh materialov* [Tables of heat engineering indicators of building materials], Moscow, 143 p.

18. Grigoriev, I. S. (1991), *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Guide], Moscow, 1232 p.

19. Blasi, W. (2012), *Spravochnik proektirovshhika. Stroitel'naya fizika* [Designer's reference guide. Building physics], Moscow, 616 p.

Статья поступила в редакцию 14. 04. 2020 г.