

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 675.026.267:66.047.1
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>

Поступила в редакцию 18.03.2020
Received 18.03.2020

А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

**КИНЕТИКА ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА И МЕТОД РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ**

Аннотация. Рассмотрены способы обработки экспериментальных данных, основанные на обобщенных переменных процесса сушки, характеризующие наиболее общие закономерности сушки в периоде падающей скорости. Представлен метод обработки опытных данных на основе развернутого уровня кинетики сушки, который позволяет получить все зависимости для расчета основных параметров процесса сушки. Приведены уравнения для определения плотностей тепловых потоков, интенсивности испарения влаги, температуры материала и длительности сушки для периода падающей скорости. Дана зависимость для вычисления числа Ребиндера, устанавливающая связь влагообмена с теплообменом для второго периода сушки. Установлены значения всех коэффициентов в уравнении для теплообменного критерия Нуссельта, необходимые для определения коэффициента теплообмена. Представлены расчеты коэффициента теплообмена для целого ряда режимов сушки натуральных кож. На основе разработанного Б. С. Сажиним метода расчета кинетики сушки установлено уравнение для определения длительности сушки кож, описывающее весь процесс сушки, включая оба периода сушки. Такой метод расчета кинетики сушки содержит минимальное количество коэффициентов, определяемых опытным путем, что сокращает объем работы при обработке данных опытов и количество необходимых экспериментов. Определены основные постоянные в критериальном уравнении теплообмена для определения коэффициента теплообмена. Дана проверка достоверности всех полученных уравнений и сопоставление расчетных и экспериментальных значений по всем параметрам кинетики сушки. Полученные результаты исследования сушки натуральных кож позволяют контролировать технологический процесс, не допуская пересушивания кож, нарушения температурного режима, что приводит к сокращению энергетических затрат на сушку.

Ключевые слова: натуральная кожа, конвективная сушка, влагосодержание, температура мокрого термометра, число Ребиндера, критерий Био, длительность сушки, интенсивность испарения

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>

Anatoly I. Alshansky, Andrej L. Klimentyev

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

**KINETICS OF HEAT AND MOISTURE EXCHANGE AND METHOD FOR CALCULATING THE DURATION
OF THE CONVECTIVE DRYING PROCESS OF NATURAL LEATHER**

Abstract. Methods for processing experimental data based on generalized variables of the drying process, which characterize the most general patterns of drying in a period of decreasing speed, are considered. A method for processing experimental data based on the expanded level of drying kinetics is presented, which allows obtaining all dependencies for calculating the main parameters of the drying process. Equations are given for determining the densities of heat fluxes, the intensity of moisture evaporation, the temperature of the material, and the duration of drying for the period of falling speed. A dependence is given for calculating the Rebinder number, which establishes a relationship between moisture exchange and heat exchange for the second drying period. The values of all the coefficients in the equation for the Nusselt heat transfer criterion,

which are necessary for determining the heat transfer coefficients, have been established. Calculations of the heat transfer coefficient for a number of modes of natural leather drying are presented. On the basis of the method for calculating the drying kinetics developed by B. S. Sazhin, an equation was established to determine the drying time of leather, which describes the entire drying process, including both drying periods. This method of calculating the kinetics of drying contains a minimum number of coefficients determined empirically, which reduces the amount of work at processing these experiments and the number of necessary experiments. The main constants in the criterial heat transfer equation for determining the heat transfer coefficient have been determined. Verification of the reliability of all obtained equations and comparison of the calculated and experimental values for all parameters of the drying kinetics are given. The obtained results of the study of drying natural leathers make it possible to control the technological process, preventing overdrying of the leather, disturbing the temperature regime, which leads to a reduction in energy costs for drying.

Keywords: natural leather, convective drying, moisture content, wet thermometer temperature, Rebinder number, Bio criterion, drying time, evaporation rate

For citation: Ol'shanskii A. I., Klimentyev A. L. Kinetics of heat and moisture exchange and method for calculating the duration of the convective drying process of natural leather. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 464–475 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>

Введение. Натуральная кожа относится к термочувствительным материалам, и сушка проводится при мягких режимах нагретым воздухом с температурой $t_c = 30 \div 60$ °С при скорости $v = 0,5 \div 2,0$ м/с с высоким влагосодержанием теплоносителя $\varphi = 40 \div 80$ %, для избежания значительной усадки и коробления материала при сушке [1–4]. Именно усадка и коробление являются основным препятствием для быстрой интенсивной сушки при повышенных температурах [1–4]. Поэтому выбор рационального режима сушки при минимальной длительности процесса с высоким качеством готового продукта имеет большое значение и требует проведения экспериментальных исследований.

Кинетика конвективной сушки тонких материалов. Изменение во времени τ среднего по объему влагосодержания \bar{u} и средней температуры \bar{t} влажного тела принято называть кривой сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурной кривой $\bar{t} = f(\tau)$ [2, 5, 6].

На рис. 1 изображены типичные для сушки тонких плоских материалов кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе сушки краснотубной юфти при следующем режиме: $t_c = 50$ °С; $v = 1$ м/с и $\varphi = 45$ %. В начальный момент времени температура тела одинакова и равна начальной t_n . Влагосодержание материала непрерывно уменьшается и стремится к равновесному u_p , а температура тела достигает температуры среды t_c при $\tau \rightarrow \infty$. Из рис. 1 видно, что кривая сушки стремится к горизонтальной асимптоте $\bar{u}(\tau) = u_p$.

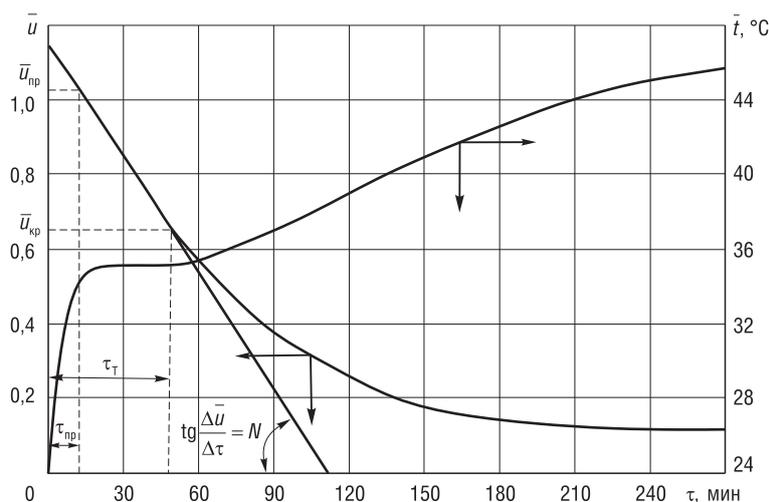


Рис. 1. Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе конвективной сушки краснотубной юфти в режиме сушки: $t_c = 50$ °С, $v = 1$ м/с и $\varphi = 45$ %

Fig. 1. The drying curve $\bar{u} = f(\tau)$ and the temperature curve $\bar{t} = f(\tau)$ in the process of convective drying of red-bodied yuft (russian leather) in the drying mode: $t_c = 50$ °С, $v = 1$ m/s and $\varphi = 45$ %

Всю кривую кинетики сушки условно разделяют на три участка, соответствующие различным периодам сушки: стадию прогрева, постоянной скорости сушки (первый период), падающей скорости сушки (второй период). В стадии прогрева подводимое к телу тепло расходуется на прогрев материала от начальной температуры t_n до температуры мокрого термометра $t_{м.т}$ и на испарение влаги. Для тонких материалов период прогрева очень мал по сравнению с другими периодами сушки. Скорость сушки в стадии прогрева возрастает от нуля до скорости сушки в первом периоде N .

В стадии прогрева удельный поток тепла $q_{пр}$ идет на нагрев влажного тела и на испарение влаги с поверхности материала

$$q_{пр} = c_{вл} \cdot \rho \cdot R_V \frac{t_c - t_n}{\tau_{пр}} + r \cdot j_{пр},$$

где $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела; ρ – плотность сухого тела; R_V – характерный размер тела, $R_V = V/F$ (отношение объема тела к поверхности испарения материала); $\tau_{пр}$ – время прогрева тела; t_n – начальная температура материала; t_c – температура теплоносителя; r – теплота парообразования; $j_{пр}$ – интенсивность испарения влаги в стадии прогрева, $j_{пр} = \bar{\alpha}(t_c - t_n)/r$, где $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи.

В стадии прогрева поток тепла $q_{пр} > q_{исп}$. Когда влажное тело прогревается, температура его растет, разность температур $(t_c - \bar{t})$ уменьшается, и поток тепла расходуется только на испарение влаги из материала ($q = q_{исп}$), наступает период постоянной скорости сушки. Температура материала становится равной температуре мокрого термометра $t_{м.т}$. Поскольку температура в периоде постоянна, то $d\bar{t}/d\tau = 0$ и число Рейбиндера $Rb = 0$ [6–8].

Первый период протекает до критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$. При уменьшении $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ наступает период падающей скорости сушки (второй период) с непрерывным увеличением температуры материала. Второй период при уменьшении влагосодержания $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ протекает в регулярном тепловом режиме.

В периоде падающей скорости сушки при $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ уже наступает регулярный тепловой режим, и регуляризация происходит по температурам, влагосодержаниям и тепловым потокам [2, 9–11].

Кинетика сушки в стадии прогрева материала приближенно аппроксимируется уравнением [5, 6]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \frac{\bar{t} - t_n}{t_{м.т} - t_n} N, \quad (1)$$

где $d\bar{u}/d\tau$ – скорость сушки; \bar{t} – средняя температура в стадии прогрева; N – скорость сушки в первом периоде, $N = \frac{\bar{\alpha}(t_c - t_n)}{r \cdot \rho \cdot R_V}$.

В случае сушки тонких тел при мягких режимах, когда можно пренебречь градиентом температуры по сечению и приближенно, допуская равенство средней температуры тела $\bar{t} = t_{пр}$, уравнение баланса тепла имеет вид [6]

$$c_{вл} \cdot G_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} F (t_c - t_{пр}), \quad (2)$$

где $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного материала, G_0 – сухая масса тела, $d\bar{t}/d\tau$ – скорость изменения температуры.

В свою очередь теплоемкость влажного материала [2] можно представить следующим образом:

$$c_{вл} = c_0 + c_{ж} \cdot \bar{u},$$

где c_0 – удельная теплоемкость сухого материала, $c_{ж}$ – теплоемкость жидкости.

Разделяя переменные и интегрируя уравнение (2), получим время прогрева материала [6]:

$$\tau_{пр} \approx \frac{c_{вл} \cdot G_0}{\bar{\alpha} \cdot F} \ln \left(\frac{t_c - t_n}{t_c - t_{м.т}} \right), \quad \tau_{пр} = \frac{c_{вл}}{\bar{\alpha}} \cdot \rho \cdot R_V \cdot \ln \left(\frac{t_c - t_n}{t_c - t_{м.т}} \right). \quad (3)$$

Основное уравнение кинетики сушки запишем в виде [2]

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} \cdot \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = N^* (1 + Rb), \quad (4)$$

где q^* – относительная плотность теплового потока; q_I, q_{II} – плотность потока тепла в первом и втором периодах сушки; $\bar{\alpha}_{кр}$ – коэффициент теплообмена в первом периоде сушки; N^* – относительная скорость сушки; Rb – число Ребиндера.

Относительная скорость сушки N^* во втором периоде зависит только от влагосодержания материала и не зависит от режима сушки [2, 5, 6, 8].

Поэтому уравнение (4) можно записать так:

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \left(\frac{\bar{u}}{u_{кр}} \right)^n \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| (1 + Rb), \quad (5)$$

где отношение $\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{u_{кр}} \right)^n$ учитывает уменьшение $\bar{\alpha}$ в периоде падающей скорости сушки [2, 6], $\Delta t_{II}/\Delta t_I$ – разности температур в первом и втором периодах сушки.

Скорость сушки [2]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u} - u_p), \quad (6)$$

где $K = \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p}$ – коэффициент сушки.

Подставляя в (6) уравнение (5):

$$\frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-n} \cdot (1 + Rb), \quad (7)$$

и принимая приближенно $\bar{u}_p = 0$, из решения (7) получаем

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} \cdot (1 + Rb). \quad (8)$$

Пренебрегая числом Ребиндера Rb при малых его значениях $Rb = 0,10 \div 0,15$ [7], определяем среднеинтегральную температуру во втором периоде из решения (8):

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n}. \quad (9)$$

Для многих капиллярно-пористых материалов зависимость числа Ребиндера Rb от влагосодержания выражается формулой [7, 8]

$$Rb = A \cdot \exp \left[-n_0 (\bar{u} - u_p) \right]. \quad (10)$$

Постоянные A и n_0 зависят от вида материала и определяются экспериментально [2].

На рис. 2, а представлена обработка опытных данных по конвективной сушке натуральных кож для зависимости (10) при режимах, указанных в табл. 1, постоянная $A = 0,15$; $n_0 = 8,5$ [4, 11].

При мягких режимах сушки кож числа Ребиндера принимают значения $Rb \approx 0,07 \div 0,15$, причем максимальные значения $Rb \approx 0,15$ соответствуют влагосодержанию $\bar{u} \rightarrow u_p$, когда процесс сушки необходимо прекращать для избегания перерасхода энергии на сушку [1, 2].

Плотность потока тепла в периоде убывающей скорости сушки при $Rb = 0$ определяется уравнением

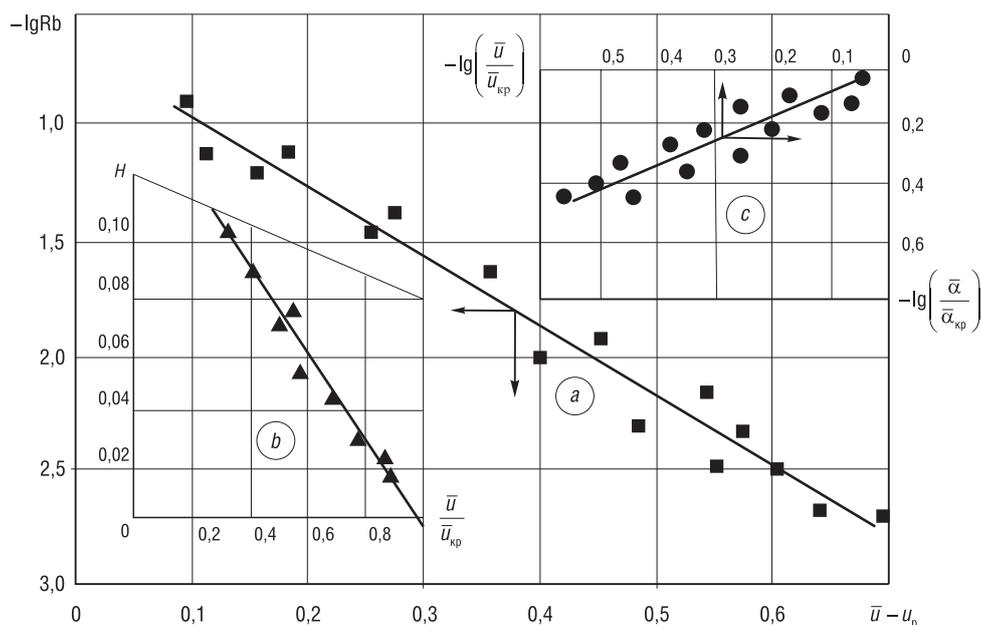


Рис. 2. Зависимости $\lg Rb = f(\bar{u})$ (a), коэффициента $H = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (b) и $\lg(\bar{u}/\bar{u}_{кр}) = f(\lg(\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}))$ (c). Режимы обозначены в табл. 1 и 2

Fig. 2. Dependencies $\lg Rb = f(\bar{u})$ (a), coefficient $H = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (b) and $\lg(\bar{u}/\bar{u}_{кр}) = f(\lg(\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}))$ (c). Modes are indicated in tables 1 and 2

$$q_{II} = q_I \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^m = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^m, \quad (11)$$

где $q_I = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N$ – плотность потока тепла в периоде постоянной скорости сушки, r – теплота парообразования, $m = 1 - n$.

В периоде падающей скорости сушки наступает регулярный тепловой режим по температурам, влажосодержанию и по тепловым потокам [2, 9–11].

При мягких режимах сушки тонких материалов значения тепломассообменных критериев Bi и Bi_m меньше 1 и в реальных условиях сушки зависят друг от друга, причем их численные значения приблизительно одинаковы [9]. При этом происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объему, и чем меньше значения этих критериев, тем быстрее все точки тела вступают в регулярный режим [9, 10]. В этих условиях лимитирующее влияние оказывает внешний тепломассообмен поверхности испарения материала с окружающей средой, при этом скорость сушки слабо зависит от внутреннего массопереноса (внешняя задача) [6, 9].

При значениях $Bi < 1$ и мягких режимах сушки градиенты температуры по сечению влажного тела малы и термическим переносом вещества можно пренебречь [6, 9].

Уравнение теплового баланса тепла для второго периода сушки

$$q_{II} = c_{вл} \cdot \rho \cdot R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau} + \rho \cdot r \cdot R_V \frac{d\bar{u}}{d\tau}. \quad (12)$$

Первый член в правой части уравнения (12) определяет поток тепла на нагрев влажного тела [2]. Балансовое уравнение тепла для нагрева влажного тела [5, 6]

$$c_{вл} \cdot \rho \cdot V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}) F. \quad (13)$$

Решение (13) имеет вид [5, 6]

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_{вл} \cdot \rho \cdot R_V} \tau_{II}\right), \quad (14)$$

где $\frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \cdot \rho \cdot R_V} = m_t$ – темп нагрева твердого тела; τ_{II} – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля.

Среднеинтегральная температура во втором периоде

$$\bar{t}(\tau) = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-m_t \cdot \tau_{\text{II}}). \tag{15}$$

Приближенное уравнение кривой кинетики сушки $\bar{u} = f(\tau)$ можно получить решением второго правого члена уравнения (12), для чего необходимо подставить в уравнение (12) уравнение (1) и темп убыли влагосодержания m_u [5].

Уравнение кривой сушки имеет вид

$$\bar{u}(\tau) = \bar{u}_0 - \frac{t_c - t_{\text{н}}}{t_{\text{м.т}} - t_{\text{н}}} \cdot N \left\{ \tau - \frac{1}{m_u} [1 - \exp(-m_u \cdot \tau)] \right\}. \tag{16}$$

В качестве примера приведем расчет кривой сушки краснотрубной юфти по уравнению (16) для режима $t_c = 50$ °С, $v = 1$ м/с и $\varphi = 45$ %:

τ , мин	37	45	60	68	84	108	136
\bar{u}	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,3	0,2
u (16)	0,82	0,70	0,58	0,47	0,37	–	–

Видно, что при влагосодержании $\bar{u} \rightarrow u_p$ кривая сушки не просчитывается. Формула (16) справедлива только до $u \approx 0,25$. При $u < 0,25$ значительная часть тепла идет на нарушение связи влаги с материалом, и теплота парообразования r не соответствует действительной [1, 3].

Б. С. Сажиным разработан метод расчета кинетики сушки на основе единого кинетического уравнения, позволяющий описывать весь процесс, включая первый и второй периоды сушки [5, 6]. При этом численные значения всех параметров, входящих в уравнение кинетики, определяются на основе одной кинетической кривой с учетом условий проведения процесса. Коэффициент скорости сушки остается постоянной величиной как в первом, так и во втором периодах сушки. В этом методе расчета исключается необходимость определения коэффициента массопроводности или других кинетических характеристик [5].

В основу метода расчета положено обобщенное уравнение массопередачи, которое применительно к конвективной сушке можно представить в виде [5]

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u} - u_p). \tag{17}$$

Произведение $(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u} - u_p)$ представляет собой обобщенную комплексную переменную процесса сушки [5].

Интегрирование (17) от начального влагосодержания \bar{u}_0 до конечного u_p с учетом влагосодержания прогрева материала $\bar{u}_{\text{пр}}$ дает длительность сушки [5]

$$\tau = \frac{G}{K(\bar{u}_0 - \bar{u}_p)} \cdot \ln \left[\frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)} \right], \tag{18}$$

где \bar{u} – текущее влагосодержание.

Величина $\bar{u}_{\text{пр}}$ легко определяется на основе экспериментальной кривой сушки и температурной кривой (см. рис. 1). Уравнение (18) позволяет рассматривать кривую сушки как единый процесс, включая все периоды сушки. При этом нет необходимости определять критическое влагосодержание $\bar{u}_{\text{кр}}$, которое зависит от режима сушки [5]. Для тонких материалов период прогрева мал и часто принимается $\bar{u}_{\text{пр}} \approx \bar{u}_0$ [5, 6].

Обозначим переменную в уравнении (18) через Z , где

$$Z = \ln \left[\frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)} \right], \tag{19}$$

и запишем уравнение (18) в виде

$$\tau = \frac{\bar{u}_0}{K(\bar{u}_0 - \bar{u}_p)} \cdot Z. \quad (20)$$

В табл. 1 и 2 представлены результаты расчетов значений параметра Z и длительности сушки по уравнениям (19) и (20).

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета параметра Z и длительности сушки по уравнениям (19) и (20) для процессов сушки краснудубной юфти и рантовой подошвы при различных режимах

Table 1. The results of the calculation of the parameter Z and the duration of drying according to equations (19) and (20) for the processes of drying of the red-bodied yuft (russian leather) and welt soles under various modes

Краснудубная юфть (пластина $200 \times 150 \times 2$ мм; $\rho_0 = 520$ кг/м ³)											
1				2				3			
$t_c = 50$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 45$ %; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,67$; $u_p = 0,125$; $N \approx 0,013$ мин ⁻¹				$t_c = 50$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 30$ %; $\bar{u}_0 = 0,93$; $\bar{u}_{кр} = 0,62$; $u_p = 0,097$; $N \approx 0,024$ мин ⁻¹				$t_c = 60$ °C; $v = 3$ м/с; $\varphi = 30$ %; $\bar{u}_0 = 0,93$; $\bar{u}_{кр} = 0,60$; $u_p = 0,076$; $N \approx 0,036$ мин ⁻¹			
\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН	\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН	\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН
0,7	45	1,06	48,4	0,7	22	0,50	23,5	0,7	13	0,35	11,6
0,6	60	1,29	64,2	0,6	38	0,86	40,4	0,6	22,9	0,75	25,4
0,5	68	1,62	70,5	0,5	49	1,21	55,2	0,5	29,5	0,97	31,9
0,4	84	1,97	87,2	0,4	76	1,72	79	0,4	38,4	1,20	39,7
0,3	108	2,65	112	0,3	113	2,52	115	0,3	83,6	2,75	92
0,2	136	3,31	141	0,2	157	3,46	159	0,2	158	4,7	157
4				5				6			
$t_c = 50$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 45$ %; $\bar{u}_0 = 0,97$; $\bar{u}_{кр} = 0,67$; $u_p = 0,120$; $N \approx 0,009$ мин ⁻¹				$t_c = 40$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 60$ %; $\bar{u}_0 = 1,40$; $\bar{u}_{кр} = 0,78$; $u_p = 0,150$; $N \approx 0,008$ мин ⁻¹				$t_c = 60$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 40$ %; $\bar{u}_0 = 0,98$; $\bar{u}_{кр} = 0,64$; $u_p = 0,120$; $N \approx 0,010$ мин ⁻¹			
\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН	\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН	\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН
–	–	–	–	0,9	55	1,15	54,2	–	–	–	–
0,7	49	0,82	47,5	0,8	70	1,45	68,2	–	–	–	–
0,6	68	1,21	70,2	0,6	117	2,35	117,5	0,6	50	1,31	50,5
0,5	89	1,63	92,7	0,5	135	2,64	132,4	0,5	68	1,81	69,7
0,4	119	2,13	121,4	0,4	175	3,50	175,2	0,4	95	2,45	94,8
0,3	150	2,63	151,3	0,3	210	4,20	210,5	0,3	125	3,20	123,7
0,2	195	3,45	197,7	0,25	275	5,45	272,6	0,25	150	3,91	154,8
Рантовая подошва (пластина $200 \times 200 \times 4,2$ мм; $\rho_0 = 980$ кг/м ³)											
1				2				3			
$t_c = 40$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 0,88$; $\bar{u}_{кр} = 0,60$; $u_p = 0,135$; $N \approx 0,0014$ мин ⁻¹				$t_c = 50$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 0,79$; $\bar{u}_{кр} = 0,62$; $u_p = 0,120$; $N \approx 0,0022$ мин ⁻¹				$t_c = 60$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 0,78$; $\bar{u}_{кр} = 0,60$; $u_p = 0,125$; $N \approx 0,008$ мин ⁻¹			
\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН	\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН	\bar{u}	$\tau_{\text{эксп}}$, МИН	Z	$\tau_{\text{расч}}$, МИН
0,60	125	0,58	126,4	0,65	82	0,63	82,5	0,60	95	0,89	97
0,53	177	0,82	178,7	0,50	152	1,20	155,8	0,53	126	1,16	126,5
0,45	232	1,08	235,2	0,40	220	1,72	225,3	0,45	165	1,55	169
0,37	310	1,46	316,5	0,30	322	2,48	324,9	0,37	215	1,99	217
0,30	400	1,85	403,3	0,25	400	3,11	404,5	0,30	278	2,58	281
0,23	515	2,38	517,4	0,20	490	3,98	498	0,23	362	3,35	365,5

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета параметра Z и длительности сушки по уравнениям (19) и (20) для процессов сушки стелечного полуваля и хромового опойка при различных режимах
 T a b l e 2. The results of the calculation of the parameter Z and the duration of drying according to equations (19) and (20) for the processes of drying of the insole plowed and chromic calf leather in different modes

Стелечный полувал (пластина 200×150×2,8 мм; $\rho_0 = 700 \text{ кг/м}^3$)											
1				2				3			
$t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1 \text{ м/с}; \varphi = 60 \text{ } \%$ $\bar{u}_0 = 1,13; \bar{u}_{кр} = 0,78; u_p = 0,145;$ $N \approx 0,0129 \text{ мин}^{-1}$				$t_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1 \text{ м/с}; \varphi = 60 \text{ } \%$ $\bar{u}_0 = 1,22; \bar{u}_{кр} = 0,72; u_p = 0,140;$ $N \approx 0,011 \text{ мин}^{-1}$				$t_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1 \text{ м/с}; \varphi = 40 \text{ } \%$ $\bar{u}_0 = 1,13; \bar{u}_{кр} = 0,77; u_p = 0,110;$ $N \approx 0,011 \text{ мин}^{-1}$			
\bar{u}	$\tau_{\text{экср, мин}}$	Z	$\tau_{\text{расч, мин}}$	\bar{u}	$\tau_{\text{экср, мин}}$	Z	$\tau_{\text{расч, мин}}$	\bar{u}	$\tau_{\text{экср, мин}}$	Z	$\tau_{\text{расч, мин}}$
0,9	32	0,53	33,5	0,9	62	1,04	63,4	0,8	27	0,85	27,2
0,7	61	0,98	61,8	0,7	93	1,54	94,2	0,7	36	1,18	37,7
0,5	92	1,48	93,5	0,5	140	2,34	142,6	0,6	43	1,41	45
0,4	118	1,96	123,8	0,4	176	2,9	176,9	0,4	62	2,0	64
0,25	195	3,16	198,5	0,25	255	4,2	256,7	0,2	110	3,5	112
Хромовый опоек (пластина 150×80×0,9 мм; $\rho_0 = 450 \text{ кг/м}^3$)											
1				2				3			
$t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1,5 \text{ м/с}; \varphi = 27 \text{ } \%$ $\bar{u}_0 = 1,60; \bar{u}_{кр} = 0,85; u_p = 0,110;$ $\bar{u}_{пр} = 1,45; N = 0,025 \text{ мин}^{-1}$				$t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}; v = 0,5 \text{ м/с}; \varphi = 50 \text{ } \%$ $\bar{u}_0 = 2,0; \bar{u}_{кр} = 1,0; u_p = 0,120;$ $\bar{u}_{пр} \approx 1,85 \text{ при } \bar{u}_{кр} < 1; t_c = 45 \text{ }^\circ\text{C};$ $\varphi = 30 \text{ } \%; u_p = 0,220;$ режим переменный				$t_c = 45 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1 \text{ м/с}; \varphi = 27 \text{ } \%$ $\bar{u}_0 = 1,8; \bar{u}_{кр} = 0,9; u_p = 0,080;$ $\bar{u}_{пр} \approx 1,67; N = 0,031 \text{ мин}^{-1}$			
\bar{u}	$\tau_{\text{экср, мин}}$	Z	$\tau_{\text{расч, мин}}$	\bar{u}	$\tau_{\text{экср, мин}}$	Z	$\tau_{\text{расч, мин}}$	\bar{u}	$\tau_{\text{экср, мин}}$	Z	$\tau_{\text{расч, мин}}$
1,2	39	0,85	38,0	1,6	23	0,85	22,6	1,2	20	1,14	20,8
1,0	60	1,32	59,1	1,4	32	1,27	33,7	1,0	26	1,42	27,2
0,8	78	1,75	78,3	1,0	52	1,98	52,7	0,8	35	1,94	36,5
0,6	108	2,37	106,2	0,8	69	2,65	70,6	0,6	45	2,41	45,5
0,4	137	2,98	134,5	0,6	87	3,38	89,9	0,4	56	3,1	58,1
0,2	195	4,3	192,5	0,4	125	4,79	127,8	0,2	79	4,2	80,2

В системе координат $Z = f(\tau)$ (где Z по формуле (19)) все кривые кинетики сушки являются прямыми, углы наклона которых представляют собой константу скорости сушки K , а отрезки, отсекаемые на оси Z , – величину $\bar{u}_{пр}$ [5]. На рис. 3 дана зависимость $Z = f(\tau)$ для ряда различных видов натуральных кож. Обозначения режимов сушки на рис. 3 соответствует обозначениям режимов в табл. 1.

Поскольку все кинетические характеристики сушки являются функциями влагосодержания и изменяются во времени, то кинетику сушки удобно рассчитывать по параметру Z . Среднеинтегральную температуру в периоде убывающей скорости сушки можно вычислить на основе параметра Z по уравнению

$$\bar{t}(\tau) = t_c - (t_c - t_{м.т}) \exp(-H \cdot Z). \tag{21}$$

Обработка опытных данных. Обработка опытных данных по конвективной сушке кож показана на рис. 2, *b*. Установлено, что коэффициент H является линейной функцией отношения $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ и аппроксимируется формулой

$$H = D \left(1 - \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right).$$

Коэффициент D при сушке натуральных кож не зависит от режима сушки и равен $D = 0,18$.

При обработке результатов опытов по методу Б. С. Сажина и регулярного режима был использован первичный материал в виде кривых сушки и температурных кривых из [3] для различных видов натуральных кож.

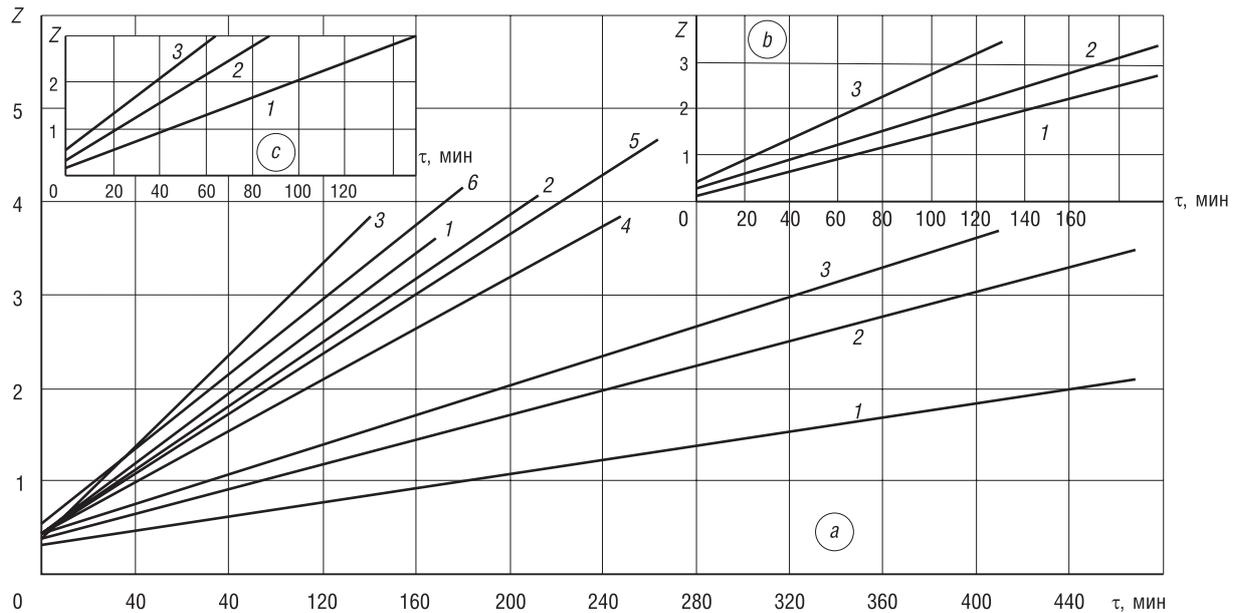


Рис. 3. Зависимость $Z = f(\tau)$ в процессах сушки краснотелой юфти, рантовой подошвы (а), стелечного полуваля (b) и хромового опойка (с) при различных режимах сушки в соответствии с обозначениями режимов, приведенными в табл. 1 и 2

Fig. 3. Dependence $Z = f(\tau)$ in the processes of drying of the red-bodied yuft (russian leather), welt soles (a), insole plowed (b) and chromic calf leather (c) for different drying modes in accordance with the designations of the modes given in Tables 1 and 2

Согласно аналогии процессов тепло- и массопереноса для регулярного режима в периоде падающей скорости сушки можно для определения темпа нагрева тела m_t и убыли влагосодержания m_u использовать следующие выражения [9–11]:

$$m_t = \frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \cdot \rho \cdot R_V}, \quad m_u = \frac{\bar{\alpha}_m}{c_m \cdot \rho \cdot R_V},$$

где $\bar{\alpha}_m$ – коэффициент массообмена, c_m – удельная массоемкость влажного тела.

Темп нагрева тела m_t и темп убыли влагосодержания m_u находятся экспериментально путем измерения температуры и влагосодержания в любых точках влажного тела для двух последовательных моментов времени в условиях регулярного режима [9–11].

Обработкой большого числа экспериментов по сушке различных видов натуральных кож в широком диапазоне изменения режимных параметров сушки установлены приближенные зависимости для темпа нагрева влажных кож m_t и темпа убыли влагосодержания m_u , которые аппроксимируются уравнениями [4, 11]:

$$m_t \approx 0,105 \cdot \exp\left(-(\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)\right), \quad (22)$$

$$m_u \approx 8,7 \cdot N \cdot \exp(-\bar{u}_0). \quad (23)$$

Представляет интерес в развитии теории сушки рассмотреть вопрос определения коэффициента теплообмена $\bar{\alpha}$ в процессе сушки. При отсутствии критериальных уравнений для расчета коэффициента теплообмена $\bar{\alpha}$ А. В. Лыковым на основе обработки опытных кривых сушки $\bar{u} = f(\tau)$ совместно с температурными кривыми $\bar{t} = f(\bar{u})$ была получена формула [3]

$$\bar{\alpha} \approx \frac{\left[(c_0 + c_{\text{ж}} \cdot \bar{u}) \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} + r \right] \cdot j}{t_c - \bar{t}}, \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}, \quad (24)$$

где $c_0 + c_{\text{ж}} \cdot \bar{u} = c_{\text{вл}}$ – удельная теплоемкость влажного материала; $d\bar{t}/d\bar{u}$ – скорость увеличения температуры, определяемая графическим дифференцированием кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$; \bar{t} – средняя температура для текущего влагосодержания \bar{u} .

Исходя из современного состояния развития теории сушки и введенного в практику сушки А. В. Лыковым числа Ребиндера Rb , уравнение (24) принимает вид

$$\bar{\alpha} \approx \frac{[(1 + Rb) \cdot r] \cdot j}{t_c - \bar{t}} \approx \frac{r \cdot j}{t_c - \bar{t}}. \tag{25}$$

При сушке натуральных кож при мягких режимах значениями числа $Rb \approx 0,10 \div 0,15$ можно пренебречь [4, 7, 11].

Интенсивность испарения влаги в периоде постоянной скорости сушки [2, 4, 11]

$$j_I = \frac{q_I}{r} = \frac{r \cdot \rho \cdot R_v \cdot N}{r} = \rho \cdot R_v \cdot N. \tag{26}$$

Интенсивность испарения в периоде падающей скорости сушки [2]

$$j_{II} \approx \rho \cdot R_v \cdot N \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \approx j_I \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right). \tag{27}$$

Обработкой большого объема экспериментальных данных по конвективной сушке различных материалов получена формула для теплообменного критерия Нуссельта [1, 2, 6]

$$Nu = B \cdot Re^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{м.т}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n, \tag{28}$$

где T_c и $T_{м.т}$ – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; отношение $\left(\bar{u} / \bar{u}_{кр} \right)^n$ учитывает уменьшение коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ в периоде убывающей скорости сушки [2, 6].

Обработкой данных по конвективной сушке кож в широком диапазоне изменения режимных параметров сушки установлено значение коэффициентов в уравнении (28): $B \approx 0,9$; $n = 0,65$. На рис. 2, с приводится обработка результатов эксперимента для зависимости $\lg(\bar{u} / \bar{u}_{кр}) = f(\lg(\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{кр}))$ по конвективной сушке натуральных кож [4, 11]. Сопоставление значений $\bar{\alpha}$ по уравнениям (24) и (28), полученных при сушке краснотубной юфти при различных режимах, показало хорошее совпадение этих значений и дано в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Зависимость коэффициента теплообмена $\bar{\alpha}$ от влагосодержания краснотубной юфти в процессах конвективной сушки, полученные по уравнениям (28) и (24) при различных режимах

Table 3. Dependence of the heat transfer coefficient $\bar{\alpha}$ on the moisture content of the red-bodied yuft (russian leather) in the processes of convective drying, obtained by equations (28) and (24) with different modes

$t_c, ^\circ\text{C}$	40	40	50	50	50	50	60	60	50
$\varphi, \%$	40	60	80	40	45	45	45	45	45
$v, \text{м/с}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	3	4	0,5	1
\bar{u}	Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$, Вт/м ² ·°C, числитель (28), знаменатель (24)								
0,80	11,5	8,3	5,4	11,5	10,5	27,5	30,0	14,8	16,5
	10,4	9,4	4,6	10,8	9,5	25,4	28,6	12,6	16,7
0,70	11,2	8,1	5,8	11,0	10,8	27,3	30,0	14,7	16,2
	10,4	9,3	4,8	10,8	10,2	25,4	28,6	12,6	16,6
0,60	9,2	7,2	4,2	11,5	9,6	27,0	27,0	13,5	13,6
	9,6	8,3	3,8	10,3	10,5	25,2	27,2	11,8	14,2
0,50	8,8	6,5	3,9	9,6	8,9	25,0	24,5	10,9	12,8
	8,6	7,2	3,4	8,9	9,2	23,3	23,7	10,3	13,2
0,40	7,9	5,7	2,9	8,8	8,6	23,0	22,6	9,8	11,6
	7,3	6,2	2,7	7,7	8,4	21,2	20,3	8,8	11,2
0,30	7,3	5,8	2,5	7,8	7,2	19,5	18,4	8,4	9,8
	5,9	4,6	2,2	6,5	6,8	16,7	16,8	6,8	9,1
0,25	6,2	3,1	–	6,5	3,5	16,0	16,4	6,5	8,1
	5,2	3,9	–	5,4	3,9	13,8	14,7	6,1	7,9

Интенсивность испарения влаги во втором периоде сушки можно также определить на основе обобщенной переменной $\exp(-m_t \tau_{II})$ по уравнению

$$j_{II} = j_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n \exp(-m_t \tau_{II}), \quad (29)$$

где τ_{II} – длительность сушки во втором периоде [4, 11]

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_u} \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right), \quad \bar{u} < u_{кр}, \quad (30)$$

где $\bar{u}_{кр}$ – влагосодержание в точке перехода от первого периода ко второму (см. рис. 1).

В табл. 4 дана проверка достоверности полученных уравнений. Видно, что погрешность вычислений параметров кинетики сушки находится в пределах точности обработки экспериментальных данных.

Т а б л и ц а 4. Проверка достоверности полученных расчетных уравнений

Table 4. Validation of the obtained calculation equations

Краснодубная юфта (пластина $200 \times 150 \times 2$ мм; $\rho_0 = 520$ кг/м ³)								
$\bar{u}_0 = 1,14; \bar{u}_{кр} = 0,65; \bar{u}_p = 0,125; N = 0,013$ мин ⁻¹ .								
Режим сушки: $t_c = 50$ °С; $v = 1,0$ м/с; $\varphi = 45$ %; $t_{м.т} = 35$ °С								
\bar{u}	$\bar{t}_{экс},$ °С	$\bar{t},$ °С (9)	$t,$ °С (15)	$t,$ °С (21)	$q_{II},$ Вт/м ² (8)	$j_{II} \cdot 10^{-3},$ кг/м ² · с (28)	$j_{II} \cdot 10^{-3},$ кг/м ² · с (30)	$\tau_{II},$ мин (31)
0,6	35,5	35,5	35,8	35,8	525	0,208	0,206	11,0
0,5	36,5	36,4	36,7	36,3	492	0,174	0,180	21,5
0,4	37,0	37,3	37,2	37,0	450	0,139	0,142	40,0
0,3	38,0	38,4	38,7	38,5	408	0,128	0,130	68,0
0,2	40,0	40,2	39,9	40,0	362	0,045	0,060	96,0

Заключение. Изложены результаты исследования конвективной сушки натуральных кож в широком диапазоне режимных параметров сушки. На основе обработки опытных данных методом кинетики сушки Б. С. Сажина и элементов теории регулярного теплового режима получены уравнения для расчета основных характеристик кинетики процесса. Проведена оценка достоверности полученных уравнений и сопоставление расчетных и экспериментальных значений параметров кинетики сушки по приведенным уравнениям. Полученные результаты исследования сушки натуральных кож позволяют контролировать технологический процесс, не допуская пересушивания кож, нарушения температурного режима, что позволяет сократить расход энергии на сушку.

Список использованных источников

1. Кавказов, Ю.Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю.Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
2. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
3. Лыков, А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А.В. Лыков. – М.: Гизлегпром, 1938. – 776 с.
4. Ольшанский, А.И. Исследование кинетики конвективной сушки натуральных кож / А.И. Ольшанский, А.Л. Климентьев, В.В. Петренко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2018. – № 1 (34). – С. 49–62.
5. Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
6. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич. – Минск: Беларус. наука, 2010. – 443 с.
7. Лыков, А.В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А.В. Лыков, П.С. Куц, А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401–406.
8. Ольшанский, А.И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена / А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 887–897.
9. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
10. Ольшанский, А.И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капилляропористых материалов в процессе их сушки / А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1308–1318.
11. Ольшанский, А.И. Исследование сушки натуральной кожи методом регулярного режима и обобщенными комплексными переменными / А.И. Ольшанский, А.Л. Климентьев // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2017. – № 1 (32). – С. 88–98.

References

1. Kavkazov Y.L. *Heat and Mass Transfer in the Technology of Leather and Shoes*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 590 p. (in Russian).
3. Lykov A. V. *Kinetics and Dynamics of Drying and Moistening Processes*. Moscow, Gizlegprom Publ., 1938. 776 p. (in Russian).
4. Ol'shanskii A. I., Klimentyev A. L., Petrenko V.V. Study of the kinetics of convective drying of natural leathers. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 1 (34), pp. 49–62 (in Russian).
5. Sazhin B. S. *Basics of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p. (in Russian).
6. Akulich P.V. *Calculations of Drying and Heat Exchangers*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
7. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A.I. Kinetics of heat transfer in the process of drying wet materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 401–406.
8. Ol'shanskii A.I. The study of heat transfer in the process of drying wet materials on the basis of experimental data of moisture exchange. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 917–928. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1089-y>
9. Lykov A. V., Mihajlov Y. A. *Heat and Mass Transfer Theory*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 535 p. (in Russian).
10. Ol'shanskii A.I. Regular thermal mode of heating of wet flat capillary-porous materials during their drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1362–1373. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1139-5>
11. Ol'shanskii A. I., Klimentyev A. L. The study of the drying of natural leather by the method of regular mode and generalized complex variables. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2017, no. 1 (32), pp. 88–98 (in Russian).

Информация об авторах

Ольшанский Анатолий Иосифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@tut.by

Климентьев Андрей Леонидович – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: klimentyev.vstu@gmail.com

Information about the authors

Anatoly I. Alshansky – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@tut.by

Andrej L. Klimentyev – Senior Lecturer of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: klimentyev.vstu@gmail.com