

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 675.026.267

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-393-401>

Поступила в редакцию 24.05.2022

Received 24.05.2022

А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь***МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ**

Аннотация. Изложен способ расчета кинетики сушки, основанный на уравнении кинетики А. В. Лыкова и кривых скорости сушки для процесса сушки натуральной кожи. Рассмотрены методы аппроксимации кривых скорости для определения времени сушки. Дано уравнение для расчета длительности сушки натуральной кожи при переменном коэффициенте сушки. В результате обработки опытных данных по сушке натуральных кож определены уравнения по вычислению плотностей потоков тепла, интенсивности испарения влаги и температуры материала в периоде падающей скорости сушки. С использованием аппроксимации кривых скорости сушки натуральных кож найдены уравнения для расчета времени сушки по методам А. В. Лыкова, В. В. Красникова, Н. С. Михеевой. Представлена зависимость относительной скорости сушки от безразмерного влагосодержания. Приведены расчеты удельных расходов теплоты на нагрев влажного материала и на испарение из него влаги. На основе уравнения кинетики сушки и уравнения для плотности потока тепла получена формула для определения среднеинтегральной температуры в периоде падающей скорости сушки. Проведены проверка достоверности опытных уравнений и сравнение расчетных значений времени сушки и температуры материала с экспериментом. Предложенные приближенные методы расчета кривой скорости сушки кожи позволяют оценить характер протекания процесса сушки конкретного материала по отдельным зонам второго периода и при изменении режима сушки. Они также дают возможность определить важнейшие параметры кинетики сушки и сократить число экспериментов.

Ключевые слова: влагосодержание, коэффициент сушки, время сушки, температура мокрого термометра, скорость сушки

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Методы расчета кинетики сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 393–401. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-393-401>

Anatolii I. Ol'shanskii, Alexej A. Kotow, Sergey M. Kuzmenkov*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus***METHODS OF CALCULATING THE KINETICS OF DRYING OF NATURAL LEATHER**

Abstract. A method for calculating drying kinetics based on A. V. Lyikov's kinetics equation and drying rate curves for the drying process of natural leather is presented. Methods of approximating velocity curves to determine the drying time are considered. An equation for calculating the drying time of natural leather with a variable drying factor is presented. Based on the processing of experimental data on drying of natural leathers, equations for calculating heat flux densities, intensity of moisture evaporation and material temperature in the period of falling drying rate are presented. Based on the approximation of drying speed curves for natural leathers, the equations for calculating the drying time by the methods of A. V. Lyikov, V. V. Krasnikov, and N. S. Mikheeva are considered. The dependence of the relative drying rate on the dimensionless moisture content is presented. The reliability of the experimental equations was checked and the calculated values of the drying time and material temperature were compared with the experiment. The proposed approximate methods of calculating the skin drying speed curve make it possible to evaluate the nature of the drying process of a particular material by individual zones of the second period and when changing the drying mode. They also make possible determination of the most important parameters of drying kinetics and reduction of the number of experiments.

Keywords: moisture content, drying coefficient, drying time, the temperature of the wet thermometer, drying speed

For citation: Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M. Methods of calculating the kinetics of drying of natural leather. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 393–401 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-393-401>

Введение. Сушка натуральных кож – не только теплофизический, но и важный технологический процесс, при котором этот материал приобретает необходимые качества промышленной кожи [1–3].

Натуральные кожи являются термочувствительными материалами, поэтому процессы сушки кожи проводятся при определенных условиях: при мягком температурном режиме воздуха $t_c = 30 \div 60$ °С, высоком влагосодержании среды $\varphi = 30 \div 80$ % и скорости воздушного потока $v = 0,5 \div 1,5$ м/с. Основным препятствием для быстрой интенсивной сушки считается значительная усадка, приводящая к короблению материала [1–5].

Под кинетикой сушки понимают изменение среднего по объему материала влагосодержания $\bar{u}(\tau)$ и средней температуры $\bar{t}(\bar{u})$ с течением времени τ . Закономерности кинетики процесса сушки дают возможность рассчитать количество испаренной влаги, расход теплоты на сушку и описать действительный процесс массотеплообмена при взаимодействии поверхности влажного тела с окружающей средой. Кинетика сушки позволяет исследовать основные закономерности сушки и дать для инженерных расчетов приближенные уравнения для определения длительности сушки τ и температуры материала \bar{t} .

Основной задачей исследования кинетики сушки является определение длительности процесса и температуры материала, поскольку эти параметры обуславливают качество подвергающегося сушке материала и размеры сушильной камеры. Аналитический путь решения этой задачи чрезвычайно сложен и не всегда возможен. В силу этих трудностей необходимо прибегать к экспериментальным исследованиям с целью разработки приближенных зависимостей для расчета основных параметров кинетики сушки с минимальным числом постоянных, определяемых опытным путем [1–6].

Цель настоящего исследования – на основе обработки опытных данных по сушке натуральной кожи и уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова получить экспериментальные уравнения для расчета основных параметров кинетики сушки натуральной кожи.

Уравнения кинетики сушки. Чтобы установить основные кинетические зависимости для расчета процесса сушки натуральной кожи, воспользуемся при обработке опытных данных уравнением кинетики сушки А. В. Лыкова и действительными кривыми скорости сушки кожи, полученными графическим дифференцированием кривых сушки [1, 6–9].

Основное уравнение кинетики сушки запишем в виде [1]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^* (1 + Rb). \quad (1)$$

Здесь q_I – плотность потока теплоты в периоде постоянной скорости сушки (первый период, $q_I = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N$, где r – теплота парообразования, ρ – плотность, $R_V = V/F$ – отношение объема тела к поверхности, N – скорость сушки в первом периоде); q_{II} – плотность потока тепла в периоде падающей скорости (второй период); N^* – относительная скорость сушки; Rb – число Ребиндера, устанавливающее связь между теплообменом и влагообменом.

В процессе сушки тонких тел, таких как кожа, при мягких режимах сушки расход теплоты на нагревание влажного тела значительно меньше расхода тепла на испарение из него влаги, и число $Rb \ll 1$. Экспериментально установлено, что при конвективной сушке натуральной кожи максимальные величины числа $Rb \approx 0,1 \div 0,15$ при $\bar{u} \rightarrow u_p$ (где u_p – равновесное влагосодержание материала) [4, 5].

Пренебрегая величиной числа Rb , при малых его значениях запишем

$$q_{II} = q_I \cdot N^* = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N \cdot N^*. \quad (2)$$

Относительная скорость сушки N^* – обобщенный комплексный параметр, не зависящий от режима сушки и являющийся лишь функцией влагосодержания материала [1, 6, 7]:

$$N^* = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|.$$

Скорость сушки [1–9] равна

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u} - u_p), \quad (3)$$

где коэффициент сушки K зависит от вида материала и режима сушки. Решение уравнения (3) показывает, что кривая сушки является убывающей экспонентой.

В действительности кривые сушки материалов представляют две или три (в случае сушки натуральной кожи) экспоненты, сопряженные в точках с влагосодержаниями $\bar{u}_{кр1}$, $\bar{u}_{кр2}$ и $\bar{u}_{кр3}$ [4, 5, 10]. Интенсивность испарения влаги в единицу времени с единицы поверхности влажного тела во втором периоде сушки также изменяется с течением времени по экспоненциальному закону [1–3]:

$$j_{II} = j_I \exp(-K \tau_{II}). \tag{4}$$

При этом интенсивность испарения влаги ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$) во втором периоде сушки можно определить по более простой зависимости:

$$j_{II} = \frac{q_{II}}{r} = \rho \cdot R_V \cdot N \cdot N^*,$$

где j_I – интенсивность испарения влаги в первом периоде сушки ($j_I = \rho \cdot R_V \cdot N$).

Приближенные методы расчета кривых сушки в периоде падающей скорости. Зависимости скорости сушки $|d\bar{u}/d\tau| = f(\tau)$ во втором периоде имеют сложный вид [1, 3, 6]. Выбор уравнения, аппроксимирующего действительную кривую скорости сушки, определяется конкретными условиями и типом кривой скорости [1, 3, 6, 10].

А. В. Лыковым был предложен метод расчета кривой скорости сушки, когда действительная кривая скорости заменяется прямой и применяется линейная аппроксимация для зависимости (3) при постоянной величине коэффициента сушки $K = \text{const}$ [1, 6, 7, 10].

На рис. 1; 2, b ; 3, b и 4, b даны типичные кривые скорости сушки для разных натуральных кож, взятые из [2, 3, 5], на которых показана линейная аппроксимация кривой скорости сушки, а на рис. 2, a и 3, a изображены кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ для юфти и рантовой подошвы.

Принимая в простейшем случае линейную аппроксимацию для зависимости (3) при коэффициенте сушки $K = \text{const}$ и в соответствии с уравнением спрямляющей прямой (см. рис. 1), интегрируя уравнение (3) при начальных условиях $\bar{u} = \bar{u}_{кр1}$ и $\tau = 0$, длительность сушки (в мин) во втором периоде равна [7, 10, 11]

$$\tau_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр1} - u_p}, \tag{5}$$

где \bar{u} – текущее влагосодержание материала, $\bar{u}_{кр1}$ – влагосодержание при переходе первого периода сушки в период падающей скорости. Значения \bar{u}_p определяются режимом сушки (см. рис. 1).

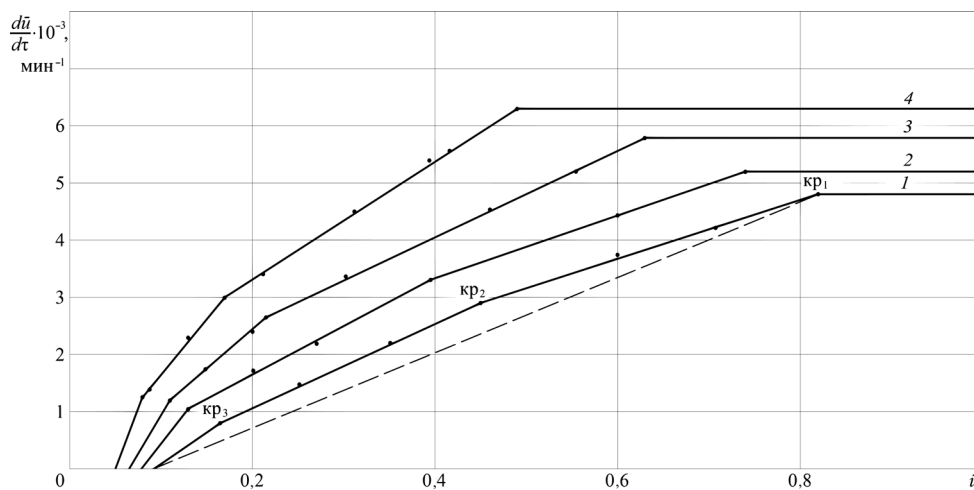


Рис. 1. Кривые скорости сушки юфти для режимов: кривая 1 – $t_c = 40^\circ\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/с}$, $\phi = 30\%$; кривая 2 – $t_c = 50^\circ\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/с}$, $\phi = 30\%$; кривая 3 – $t_c = 50^\circ\text{C}$, $v = 1,5 \text{ м/с}$, $\phi = 60\%$; кривая 4 – $t_c = 60^\circ\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/с}$, $\phi = 35\%$

Fig. 1. Drying speed curves of yuft for the modes: curve 1 – $t_c = 40^\circ\text{C}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, $\phi = 30\%$; curve 2 – $t_c = 50^\circ\text{C}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, $\phi = 30\%$; curve 3 – $t_c = 50^\circ\text{C}$, $v = 1.5 \text{ m/s}$, $\phi = 60\%$; curve 4 – $t_c = 60^\circ\text{C}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, $\phi = 35\%$

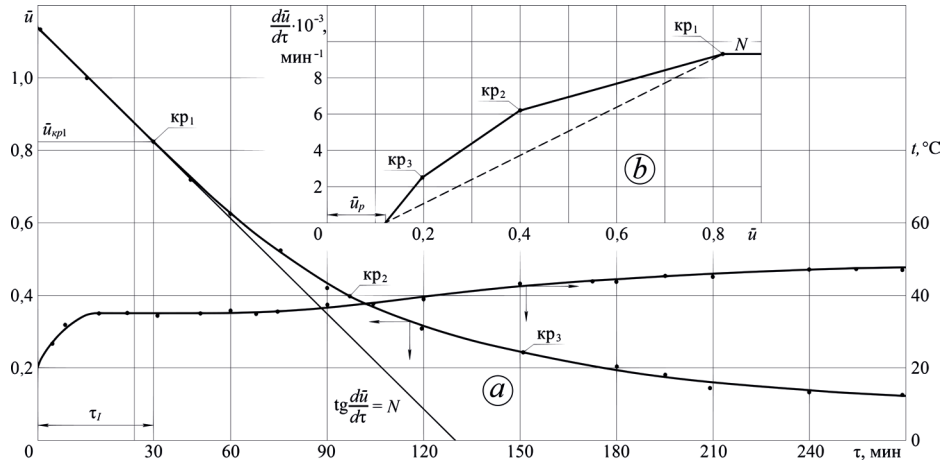


Рис. 2. Кривая сушки и температурная кривая (а), кривая скорости сушки (b) для режима сушки юфти: $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$, $\varphi = 45\text{ \%}$

Fig. 2. Drying curve and temperature curve (a), drying speed curve (b) for the drying mode of the yuft: $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$, $\varphi = 45\text{ \%}$

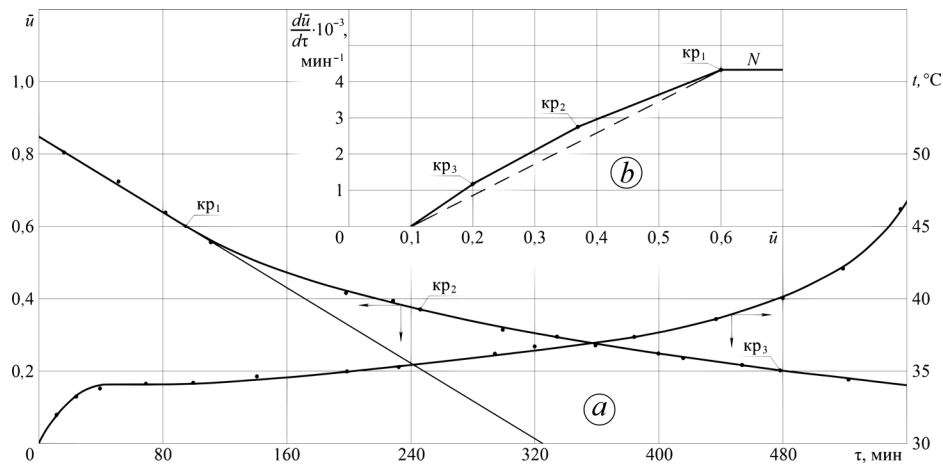


Рис. 3. Кривая сушки и температурная кривая (а), кривая скорости сушки (b) для режима сушки рантовой подошвы: $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0,5\text{ м/с}$, $\varphi = 50\text{ \%}$

Fig. 3. Drying curve and temperature curve (a), drying speed curve (b) for the drying mode of the welt outsole: $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0.5\text{ м/с}$, $\varphi = 50\text{ \%}$

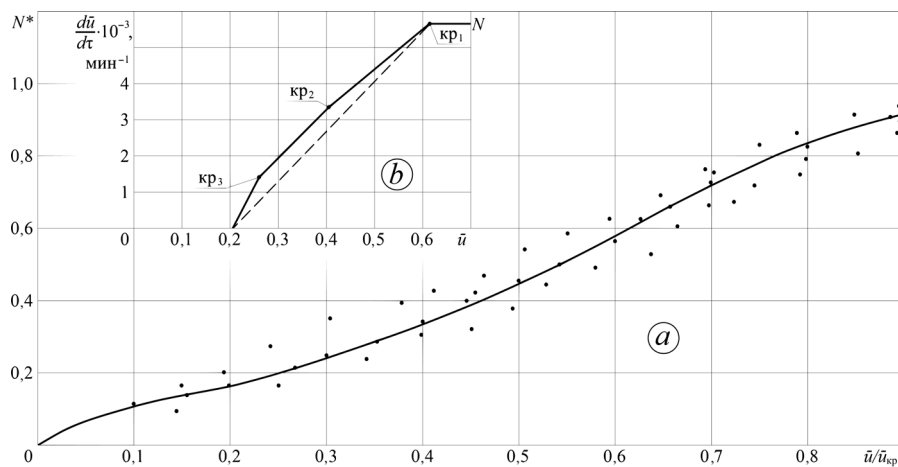


Рис. 4. Зависимость относительной скорости сушки N^* от безразмерного влагосодержания $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ (а) и кривая скорости сушки (b) юфти при режиме: $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$, $\varphi = 60\text{ \%}$

Fig. 4. Dependence of the relative drying rate N^* on the dimensionless moisture content $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ (a) and the curve of the drying speed (b) of the yuft at the regime: $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$, $\varphi = 60\text{ \%}$

При однозональном методе расчета кривой скорости сушки коэффициент сушки K (мин⁻¹) равен приближенно [7]

$$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{кр1} - u_p}. \quad (6)$$

С учетом времени сушки в первом периоде продолжительность процесса сушки определяется формулой [4, 5]

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{1}{N} \left((\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - (\bar{u}_{кр} - u_p) \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right). \quad (7)$$

Скорость сушки в любой момент второго периода можно определить по величине N в первый период для любого режима сушки и величине N^* для данного влагосодержания \bar{u} по выражению [11]

$$N \cdot N^* = \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|. \quad (8)$$

Подставляя (8) в уравнение (3), получим выражение для коэффициента сушки K

$$K = \frac{N \cdot N^*}{\bar{u} - u_p}. \quad (9)$$

В реальных условиях сушки коэффициент сушки K величина переменная, поэтому аппроксимация действительной кривой скорости сушки прямыми является приближенной.

В результате обработки и анализа более 20 кривых скорости сушки различных натуральных кож, приведенных в [2–5], авторами настоящего исследования была получена графическая зависимость $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$, изображенная на рис. 4, а. Видно, что кривая $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ повторяет форму кривой скорости сушки натуральной кожи с размытыми границами перехода от одной зоны к следующей, что объясняется множеством режимов сушки с различными значениями критических влагосодержаний по зонам сушки.

Определим расходы теплоты, подводимой к влажному образцу кожи на нагрев и на испарение из него влаги для режима сушки пластины юфти ($200 \times 150 \times 1,7$ мм) – $t_c = 50$ °С; $\varphi = 45$ %; $v = 1$ м/с; $\rho = 520$ кг/м³; $\bar{u}_0 = 1,13$; $\bar{u}_{кон} = 0,25$. Время сушки $\tau = 150$ мин. Количество теплоты Q (Дж), подводимой от воздуха к образцу кожи, определяется следующим образом:

$$Q = c_{cp} \cdot \rho \cdot V \cdot (\bar{t} - t_n),$$

где c_{cp} – средняя удельная теплоемкость юфти за весь период сушки до $\bar{u}_{кон} = 0,25$; объем образца $V = 5,1 \cdot 10^{-5}$ м³; начальная температура кожи $t_n = 20$ °С, конечная $\bar{t}_{кон} = 42$ °С.

Удельная теплоемкость влажной кожи рассчитывается по формуле

$$c_{вл} = c_0 + c_v \cdot \bar{u},$$

где теплоемкость сухой юфти $c_0 = 1450$ Дж/(кг·°С), теплоемкость воды $c_v = 4200$ Дж/(кг·°С). Удельная теплоемкость юфти при $\bar{u}_0 = 1,13$ и $\bar{u}_{кон} = 0,25$ соответственно равны $c_{вл1} = 6199$ Дж/(кг·°С) и $c_{вл2} = 2500$ Дж/(кг·°С). Средняя удельная теплоемкость юфти в процессе сушки $c_{cp} \approx 4350$ Дж/(кг·°С).

Расход теплоты на нагрев и испарение влаги из образца кожи рассчитывался следующим образом:

$$Q = 4350 \cdot 520 \cdot 5,1 \cdot 10^{-5} \cdot 22 \approx 2539 \text{ Дж.}$$

Удельный расход теплоты на единицу объема равнялся

$$Q = c_{cp} \cdot \rho \cdot (\bar{t} - t_n) = 4350 \cdot 520 \cdot 22 \approx 50 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

Удельный расход теплоты на единицу поверхности определялся по выражению

$$Q = c_{cp} \cdot \rho \cdot R_V \cdot (\bar{t} - t_n) = 4350 \cdot 520 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \approx 3845 \text{ Дж/м}^2.$$

Экспериментально установлено, что коэффициенты теплоотдачи $\bar{\alpha}$ в периоде падающей скорости сушки уменьшаются со снижением влагосодержания по эмпирической формуле [1, 3, 6, 7]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n \quad (10)$$

Для всех натуральных кож при конвективной сушке показатель $n = 0,6$ [4, 5].

На основе уравнения кинетики сушки и уравнений для теплового потока, скорости сушки путем обработки кривых сушки более 20 различных видов натуральных кож были установлены зависимости для отношения критериев Нуссельта по периодам сушки и для безразмерных температур [9]:

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_{\text{кр}}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = N^{*0,57}; \quad (11)$$

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_{\text{кр}}} \cdot \frac{t_c - t_{\text{II}}}{t_c - t_{\text{M}}} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} \quad (\text{Rb} = 0), \quad (12)$$

где t_{II} – температура на поверхности материала, t_{M} – температура мокрого термометра;

$$\frac{t_c - t_{\text{II}}}{t_c - t_{\text{M}}} = N^{*0,43}. \quad (13)$$

В условиях сушки тонких материалов при малых градиентах температуры по сечению влажного тела можно принимать температуру на поверхности приблизительно равной среднеинтегральной ($t_{\text{II}} \approx \bar{t}$) [6].

Подставляя в (11) уравнение (10), получим

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{0,57} \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{1,05}. \quad (14)$$

Экспериментальная кривая $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}})$ (см. рис. 4, а) хорошо аппроксимируется уравнением (14). С учетом (14) уравнение (9) для коэффициента сушки примет вид

$$K = \frac{N \cdot \left(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}} \right)^{1,05}}{\bar{u} - u_p}. \quad (15)$$

Подставляя в однозональный метод расчета длительности сушки (5) с постоянным коэффициентом сушки K уравнение (15), получим длительность сушки при переменном значении K в процессе конвективной сушки кожи:

$$\tau \approx \frac{1}{N} \left(\left(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{кр}} \right) - \frac{\bar{u} - u_p}{\left(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}} \right)^{1,05}} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} \right). \quad (16)$$

Типичные кривые скорости сушки на рис. 1; 2, б; 3, б и 4, б состоят из трех зон, в каждой из которых коэффициент сушки K – постоянная величина. Принимая зональный метод обработки опытных данных В. В. Красникова [11] для процесса сушки натуральных кож, длительность сушки для кривых скорости сушки, состоящих из трех зон, определяется уравнением [4, 5, 11]

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{кр}1}}{N} + \frac{1}{K_1} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}1} - u_p}{\bar{u}_1 - u_p} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}2} - u_p}{\bar{u}_{\text{II}} - u_p} + \frac{1}{K_3} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}2} - u_p}{\bar{u}_{\text{III}} - u_p}, \quad (17)$$

где $\bar{u}_1, \bar{u}_{\text{II}}, \bar{u}_{\text{III}}$ – влагосодержания по зонам, причем $\bar{u}_{\text{кр}2} < \bar{u}_1 < \bar{u}_{\text{кр}1}$; $\bar{u}_{\text{кр}3} < \bar{u}_{\text{II}} < \bar{u}_{\text{кр}2}$; $u_p < \bar{u}_{\text{III}} < \bar{u}_{\text{кр}3}$.

Необходимо отметить, что при сушке натуральной кожи при $\bar{u} < 0,2$ значительная часть теплоты идет на нарушение связи влаги с материалом. Энергия связи влаги увеличивается и теплота парообразования r и массообменные коэффициенты переноса не соответствуют действительным значениям [2, 3]. Поэтому третья зона кривой сушки рассчитывается с погрешностью более 5 %.

В табл. 1 приведены результаты расчета времени сушки по формулам (7), (16) и (17) и сравнение расчетных значений с экспериментом для процессов сушки юфти и рантовой подошвы.

Погрешность в расчетах длительности сушки составляет 5–7 % и находится в пределах точности обработки опытных данных.

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета длительности сушки и температуры материала по формулам (7), (16), (17) и сопоставление расчетных значений с опытными для процессов сушки юфты и рантовой подошвы

Table 1. Results of calculation of drying time and material temperature according to the formulas (7), (16), (17) and comparison of calculated values with experimental ones for the processes of drying the yuft and welt outsoles

Юфта хромового дубления, пластина 150 × 150 × 1,7 мм; ρ = 520 кг/м ³ , $\bar{u}_0 = 1,132$, $\bar{u}_{кр1} = 0,82$, $\bar{u}_{кр2} = 0,41$, $\bar{u}_{кр3} = 0,22$, $\bar{u}_p = 0,12$. Режим сушки: $t_c = 50$ °С, φ = 45 %, v = 1 м/с. N = 9,8·10 ⁻³ мин ⁻¹ , j ₁ = 1,42·10 ⁻³ кг/(м ² ·с), t _m = 35 °С, τ ₁ = 32 мин, K ₁ ≈ 0,0148 мин ⁻¹ , K ₂ ≈ 0,017 мин ⁻¹ , K ₃ ≈ 0,028 мин ⁻¹								
\bar{u}	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (7)	τ, мин (16)	τ, мин (17)	t, °С (экс.)	t, °С (21)	t, °С (23)
0,7	0,85	45	46,5	46,5	48,5	35,5	35,3	36,0
0,6	0,73	60	60,4	60,2	63,2	36,5	36,5	37,0
0,5	0,61	75	77,4	75,2	74,8	37,0	37,2	38,1
0,4	0,48	98	101,5	99,5	96,6	38,5	39,0	39,1
0,3	0,36	123	126,6	123,4	124,6	39,5	39,5	40,2
0,25	0,30	150	153,3	150,3	150,8	41,5	42,0	41,4
Рантовая подошва, пластина 250 × 150 × 4,2 мм; ρ = 950 кг/м ³ , $\bar{u}_0 = 0,86$, $\bar{u}_{кр1} = 0,62$, $\bar{u}_{кр2} \approx 0,39$, $\bar{u}_{кр3} \approx 0,19$, $\bar{u}_p = 0,1$. Режим сушки: t _c = 50 °С, φ = 50 %, v = 0,5 м/с. N = 2,32·10 ⁻³ мин ⁻¹ , j ₁ = 9,18·10 ⁻³ кг/(м ² ·с), t _m = 34 °С, τ ₁ = 92 мин, K ₁ ≈ 0,005 мин ⁻¹ , K ₂ ≈ 0,0063 мин ⁻¹ , K ₃ ≈ 0,0086 мин ⁻¹								
\bar{u}	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (7)	τ, мин (16)	τ, мин (17)	t, °С (экс.)	t, °С (21)	t, °С (23)
0,5	0,83	142	138,8	136,9	136,6	35,0	35,4	35,3
0,4	0,67	204	202	197,3	198,4	36,5	37,0	36,7
0,3	0,50	290	287,7	286,7	287,0	38,0	38,5	38,3
0,25	0,416	350	346,4	356,0	346,4	39,0	39,5	39,2
0,20	0,333	468	466,5	–	459,6	42,0	41,6	41,2

На основе обработки опытных данных по конвективной сушке различных капиллярно-пористых материалов Н. С. Михеевой [3] было получено простое уравнение для определения времени сушки, включая первый и второй периоды сушки, без необходимости определения критического влагосодержания материала.

Уравнение Н. С. Михеевой применительно для сушки натуральной кожи имеет вид

$$\tau = \frac{1,8}{N} \left((\bar{u}_0 - u_p) - 0,56\bar{u}_0 \right) \ln \left(\frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p} \right). \tag{18}$$

В табл. 2 даны расчеты времени сушки по формуле Н. С. Михеевой для различных натуральных кож.

Температура в периоде падающей скорости сушки определяется из уравнений (12) и (13), принимая t_п ≈ \bar{t} и числа Rb = 0.

Учитывая отношение

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right),$$

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета длительности сушки по формуле Н. С. Михеевой для различных видов натуральной кожи

Table 2. Results of calculation of drying time according to the formula of N. S. Mikheeva for different types of natural leather

Юфта хромового дубления, пластина 200 × 150 × 1,7 мм; ρ = 520 кг/м ³ . Режим сушки: t _c = 50 °С, φ = 45 %, v = 1 м/с; $\bar{u}_0 = 1,13$, $\bar{u}_{кр} = 0,82$, $u_p = 0,12$, N = 9,8·10 ⁻³ мин ⁻¹			Рантовая подошва, пластина 200 × 200 × 4,2 мм; ρ = 980 кг/м ³ . Режим сушки: t _c = 60 °С, φ = 50 %, v = 0,5 м/с; $\bar{u}_0 = 0,78$, $\bar{u}_{кр} = 0,6$, $u_p = 0,12$, N = 1,9·10 ⁻³ мин ⁻¹		
\bar{u}	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)	\bar{u}	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)
0,7	45	44,9	0,6	95	94,5
0,6	60	57,8	0,53	132	135,7
0,5	75	73,6	0,45	174	177,8
0,4	98	96,4	0,37	222	225,6
0,3	123	121,5	0,30	282	279,7
0,25	150	146,6	0,25	362	358,5

Стелечный полувал, пластина 200 × 150 × 2,8 мм; ρ = 700 кг/м ³ . Режим сушки: t _c = 60 °С, φ = 60 %, v = 1 м/с, $\bar{u}_0 = 1,13$, $\bar{u}_{кр} = 0,78$, u _p = 0,13, N = 8·10 ⁻³ мин ⁻¹			Хромовый опоек, пластина 150 × 80 × 0,9 мм; ρ = 450 кг/м ³ . Режим сушки: t _c = 50 °С, φ = 27 %, v = 1,5 м/с, $\bar{u}_0 = 1,6$, $\bar{u}_{кр} = 0,85$, u _p = 0,11, N = 11,3·10 ⁻³ мин ⁻¹		
\bar{u}	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)	\bar{u}	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)
0,9	32	31,6	1,2	34	32,4
0,7	59	56,5	1,0	53	49,5
0,5	92	92,4	0,8	74	71,4
0,4	118	118,5	0,6	105	103,4
0,25	191	188,2	0,4	140	143,3
–	–	–	0,25	195	198,3

запишем уравнение (12) следующим образом (принимая u_p = 0):

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_m} \cdot \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_m} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right); \quad (19)$$

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_m} \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} \approx \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right)^{1-n}. \quad (20)$$

При конвективной сушке натуральной кожи при температурах t_c = 40–60 °С и высокой относительной влажности воздуха φ = 30–80 % необходимо учитывать равновесное влагосодержание (u_p = 0,1–0,18).

Среднеинтегральная температура в процессе сушки кожи из уравнения (20) равна

$$\bar{t} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right)^{0,4}. \quad (21)$$

Среднеинтегральная температура материала из уравнения (13) определяется зависимостью

$$\bar{t} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot N^{*0,43}. \quad (22)$$

Подставляя в (22) отношение (14), получим

$$\bar{t} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,45}. \quad (23)$$

Различие в показателях степени в уравнениях (21) и (23) показывает погрешность обработки опытных данных по разным методам, но разброс значений температур по формулам находится в пределах 5 %.

Значения интегральных температур по уравнениям (21) и (23) и сравнение с экспериментом приведены в табл. 1.

Заключение. Таким образом, уравнения кинетики сушки позволяют получить основные формулы для расчета кинетики сушки натуральной кожи, выявить общую закономерность протекания процесса сушки при различных методах аппроксимации действительной кривой скорости сушки. Полученные приближенные уравнения дают возможность оценить протекание процесса сушки при изменении режима и определить главные кинетические характеристики – время сушки и температуру материала в периоде падающей скорости. Приближенные уравнения, полученные на основе обработки действительных кривых скорости сушки, имеют практическое значение при расчетах кинетики сушки и позволяют оценить количественные изменения, вызванные изменением режима сушки.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
2. Лыков, А. В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А. В. Лыков. – М.: Гизлегпром, 1938. – 776 с.

3. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
4. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>
5. 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.
6. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Белорус. наука, 2010. – 443 с.
7. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
8. Куц, П. С. Некоторые закономерности теплообмена и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1977. – Т. 32, № 6. – С. 1007–1014.
9. 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.
10. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
11. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

References

1. Lykov A. V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 590 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Kinetics and Dynamics of Drying and Humidification Processes*. Moscow, Gizlegprom Publ., 1938. 776 p. (in Russian).
3. Kavkazov Y. L. *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
4. Olshansky A. I., Klimentiev A. L. Heat and moisture exchange kinetics and method for calculating the duration of convective drying 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>
5. Olshansky A. I., Klimentiev A. L., Petrenko V.V. Study of kinetics of convective drying of natural leathers. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 1 (34), pp. 49–62 (in Russian).
6. Akulich P. V. *Calculations Drying and Heat Exchange Systems*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 444 p. (in Russian).
7. Rudobashta S. P. *Mass-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
8. Kuts P. S., Olshansky A. I. Some features of heat and moisture transfer and approximate methods of calculating the drying kinetics of moist materials. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of Engineering Physics*, 1977, vol. 32, no. 6, pp. 1007–1014 (in Russian).
9. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshansky A. I. Heat transfer kinetics in the process of wet materials drying. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of Engineering Physics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 401–406 (in Russian).
10. Sazhin B. S. *Fundamentals of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p. (in Russian).
11. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ольшанский Анатолий Иосифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Котов Алексей Анатольевич – ассистент кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Кузьменков Сергей Михайлович – ассистент кафедры «Технология машиностроения», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Information about the authors

Anatolii I. Ol'shanskii – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

Alexej A. Kotow – Assistant at the Department of Heat Power Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

Sergey M. Kuzmenkov – Assistant at the Department of Mechanical Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by