

А. И. Ольшанский, А. С. Марущак*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь***КИНЕТИКА ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА И ТЕМПЕРАТУРА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ
ТКАНЕЙ**

Аннотация. Изложены способы аппроксимации кривой скорости сушки тканей по методам А. В. Лыкова и В. В. Красникова. Приведены результаты обработки опытных данных по конвективной сушке тканей. Даны уравнения для определения времени сушки тканей, плотности тепловых потоков и температуры тканей в процессе сушки. Приведены уравнения для определения коэффициента сушки и относительной скорости сушки. Рассмотрен аналитический метод определения температуры для периода падающей скорости сушки. Дано сопоставление значений температуры по результатам аналитических решений со значениями, полученными по экспериментальной формуле. Показано, что число Био при сушке тканей меньше единицы и основным лимитирующим фактором является внешний теплообмен поверхности испарения влаги с поверхности материала с окружающей средой. Представлена проверка достоверности полученных расчетных значений с экспериментальными. Несовпадение значений находится в пределах 5 % точности проведения и обработки эксперимента.

Ключевые слова: влагосодержание, коэффициент сушки, коэффициент теплоотдачи, длительность сушки, число Био

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и температура в процессе сушки тканей / А. И. Ольшанский, А. С. Марущак // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 449–457. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-457>

Anatolii I. Ol'shanskii, Alexey S. Marushchak*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus***HEAT AND MOISTURE TRANSFER KINETICS AND TEMPERATURE DURING DRYING OF FABRICS**

Abstract. The methods of approximation of the curve of the drying rate of fabrics according to the methods of A. V. Lykov and V. V. Krasnikov are described. The results of processing experimental data on convective tissue drying are presented. Equations are given for determining the drying time of fabrics, the density of heat flows and the temperature of fabrics during the drying process. The equations for determining the drying coefficient and the relative drying rate are given. An analytical method for determining the temperature for the period of falling drying rate is considered. The comparison of the temperature values according to the results of analytical solutions with the values obtained by the experimental formula is given. It is shown that the number of Bio during drying of fabrics is less than one, and the main limiting factor is the external heat and moisture exchange of the evaporation surface from the surface of the material with the environment. Verification of the reliability of the calculated values obtained with experimental ones is presented. The discrepancy between the values is within 5 % of the accuracy of the experiment and processing.

Keywords: moisture content, drying coefficient, heat transfer coefficient, drying duration, Bio number

For citation: Ol'shanskii A. I., Marushchak A. S. Heat and moisture transfer kinetics and temperature during drying of fabrics. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 449–457 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-457>

Введение. Сушка является необходимым процессом, в котором ткани приобретают окончательные технологические качества. После механического отжима в процессе сушки ткани проходят целый ряд технологических операций, связанных с большими затратами энергии [1, 2].

Для расчета процесса сушки необходимы простые экспериментальные уравнения с минимальным числом постоянных, определяемых опытным путем.

Постановка задачи. Основной задачей кинетики процесса сушки является определение длительности сушки. Все необходимые расчетные кинетические зависимости можно получить из решения дифференциальных уравнений теплообмена. Однако задача получается сложной

в аналитическом отношении, поскольку сушка – процесс нестационарный. Поэтому необходимы опытные исследования, чтобы разработать простые и надежные уравнения для расчета основных кинетических характеристик.

Кинетика сушки тканей. После механического отжима с влажностью $\bar{u}_0 = 1,1-1,3$ ткани подвергаются сушке. Сушка тканей, в отличие от многих других тонких материалов, начинается сразу от начального влажностного содержания и протекает в периоде падающей скорости сушки. Температура тканей при сушке также сразу становится выше температуры мокрого термометра $t_{\text{м.т.}}$.

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова для процесса сушки тканей имеет вид [1, 4]

$$\frac{q}{q_{\text{max}}} = N^* \cdot (1 + \text{Rb}), \quad (1)$$

где q , q_{max} – соответственно плотности теплового потока в периоде падающей скорости и максимальный тепловой поток; Вт/м^2 ; Rb – число Ребиндера; N^* – относительная скорость сушки, с^{-1} .

Максимальный тепловой поток определяется из уравнения теплового баланса, при этом число Ребиндера принимается $\text{Rb} = 0$:

$$q_{\text{max}} = \rho R_V r N_{\text{max}},$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3 ; R_V – отношение объема тела к площади поверхности, м; r – теплота парообразования, Дж/кг.

Исходя из приведенных выше выражений плотность теплового потока в процессе падающей скорости сушки рассчитывается следующим образом:

$$q = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N_{\text{max}} \cdot N^*.$$

В свою очередь относительная скорость сушки равна [3–5]

$$N^* = \frac{1}{\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right)_{\text{max}}} \cdot \left|\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right| = \frac{1}{N_{\text{max}}} \cdot \left|\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right|. \quad (2)$$

При сушке таких очень тонких материалов, как ткани, расход теплоты на нагревание значительно меньше теплоты на испарение влаги из тканей и $\text{Rb} \ll 1$, поэтому величиной Rb можно пренебречь [4, 6].

Скорость сушки [3–6] рассчитывается следующим образом:

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

где K – коэффициент сушки, который зависит от вида материала и режима сушки; \bar{u} , u_p – соответственно текущее и равновесное влажностного содержания материала.

На основе введенной Г. К. Филоненко в практику сушки обобщенной кривой сушки В. В. Красников получил выражение [5, 7, 8]

$$\left|\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right| = N^* \cdot N_{\text{max}}. \quad (4)$$

Подставляя N^* в уравнение (4), получим выражение для коэффициента сушки K :

$$K = \frac{N^* N_{\text{max}}}{\bar{u} - u_p}. \quad (5)$$

При сушке материалов только в периоде падающей скорости сушки коэффициент сушки K определяется через N_{max} . Относительная скорость сушки N^* является обобщенной переменной, поэтому не зависит от режима сушки и для конкретного материала является лишь функцией влажностного содержания [4, 5].

Определение времени сушки τ представляет основную задачу кинетики сушки. Ее решение возможно как на основе интегрирования дифференциального уравнения массопроводности, так и опытным путем получения экспериментальных уравнений. Аналитический путь крайне сложен и не всегда возможен.

Зависимость скорости сушки от влагосодержания материала $(d\bar{u}/d\tau) = f(\tau)$ в общем случае имеет сложный вид.

На рисунке, *a* даны кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ при конвективной сушке шерстяных тканей [7]. Режимы сушки указаны в табл. 1.

На рисунке, *b* изображены кривые скорости сушки тканей для режимов 1, 4, 5. Видно, что кривые скорости обращены выпуклостью к оси ординат. Такие кривые скорости наблюдаются при сушке очень тонких материалов (ткань, бумага и др.).

Результаты обработки кривых скорости сушки тканей для зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$ приводятся на рисунке, *c*. Все режимы сушки тканей укладываются на одну кривую, которая приближенно аппроксимируется уравнением

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^{0,5}. \quad (6)$$

При расчете длительности сушки в простейшем случае по однозональному методу А. В. Лыкова [3, 4, 9] применяют линейную аппроксимацию для зависимости (3). В соответствии с уравнением этой спрямляющей прямой (рисунок, *b*, режим 1) для коэффициента сушки K можно записать

$$K = \frac{N_{\max}}{\bar{u}_0 - u_p}, \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (3), при постоянном коэффициенте сушки запишем

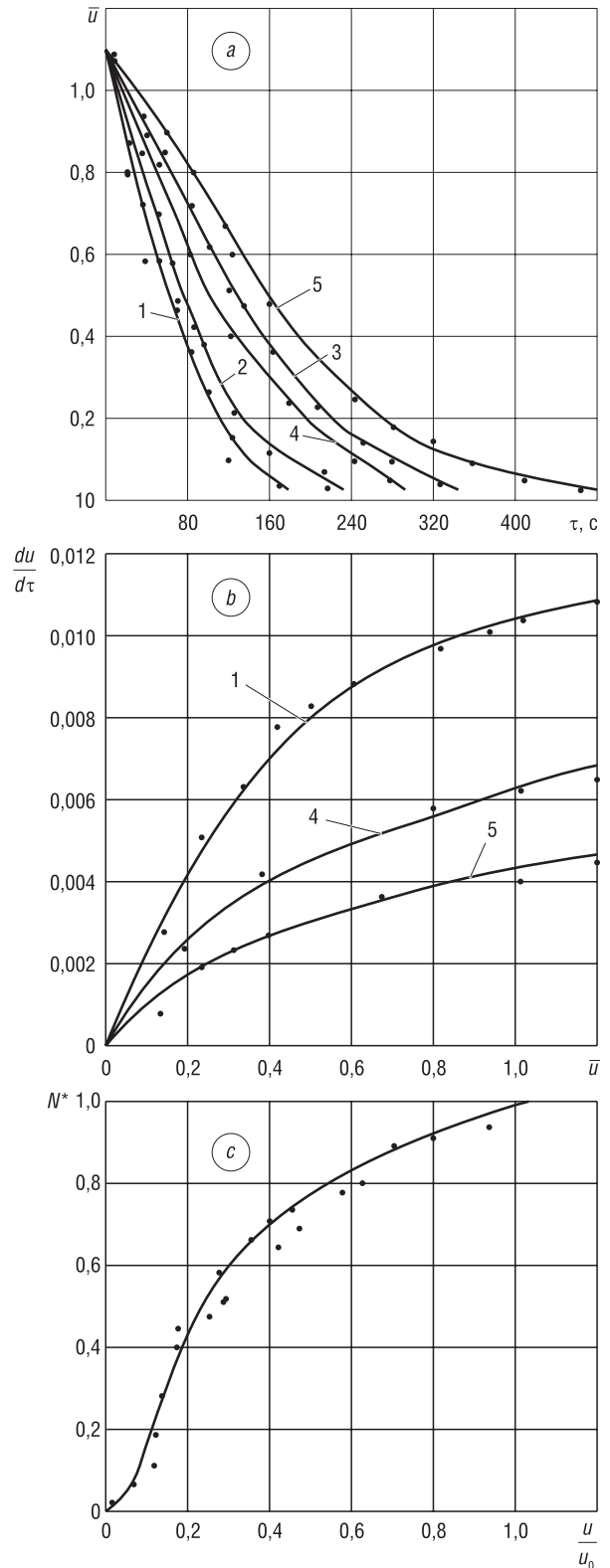
$$\int_0^{\tau} d\tau = -\frac{1}{K} \int_{\bar{u}}^{u_p} \frac{d\bar{u}}{\bar{u} - u_p}.$$

Используя данный интеграл при постоянном K , получим длительность сушки тканей:

$$\tau = \frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u}_0 - u_p}{\bar{u} - u_p}. \quad (8)$$

При расчете длительности сушки по двухзональному методу В. В. Красникова [4–6] кривая скорости сушки (рисунок, *b*, режим 5) заменяется ломаной прямой и весь период сушки делится на две зоны, в каждой из которых скорость сушки изменяется от влагосодержания по линейному закону. Переход от первой зоны ко второй происходит при достижении критического влагосодержания $u_{кр}$.

Коэффициенты сушки K_1 и K_2 соответственно для первой и второй частей периода численно равны тангенсам углов наклона этих отрезков прямых к оси влагосодержаний [4–6].



Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ в процессе сушки шерстяных тканей (табл. 1) (*a*); кривые скорости сушки для режимов 1, 4, 5 (*b*) и зависимость относительной скорости сушки от отношения влагосодержания (*c*)

Drying curves $\bar{u} = f(\tau)$ during the drying of woolen fabrics (Table 1) (*a*); drying rate curves for modes 1, 4, 5 (*b*) and the dependence of the relative drying rate on the moisture content ratio (*c*)

Т а б л и ц а 1. Режимы сушки тканей

T a b l e 1. Drying modes of fabrics

Параметр	Режим сушки				
	1	2	3	4	5
Начальное влагосодержание, u_0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Равновесное влагосодержание, u_p	0,017	0,016	0,018	0,04	0,045
Температура воздуха, t_c , °C	90	90	87	63	47
Скорость воздуха, v , м/с	5,3	2,8	0,9	5,6	5,6
Относительная влажность воздуха, ϕ , %	6	5	4	24	30
Максимальная скорость сушки, N_{\max} , c^{-1}	0,01150	0,0095	0,0055	0,0065	0,0044

Длительность сушки по методу В. В. Красникова для тканей определяется уравнением

$$\tau = \frac{1}{K_1} \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_I} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}_{II}}, \quad (9)$$

где \bar{u}_I , \bar{u}_{II} – соответственно текущие влагосодержания в первой и второй частях периода. Коэффициенты сушки K_1 и K_2 определяются по уравнениям (5) и (6).

При исследовании конвективной сушки различных капиллярнопористых влажных материалов Н. С. Михеева получила простое выражение для определения длительности сушки. Так, для материалов, сушка которых протекает только в периоде падающей скорости, выражение имеет вид [10]

$$\tau = \frac{1,8}{N_{\max}} \left[\left((\bar{u}_0 - u_p) - 0,56\bar{u}_0 \right) \right] \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p}. \quad (10)$$

В табл. 2 даны результаты расчета длительности сушки шерстяной ткани для режима 1 по формулам (8)–(10).

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета длительности сушки шерстяной ткани для режима 1 и сравнение расчетных значений с экспериментом

T a b l e 2. The results of calculating the drying time of woolen fabric for mode 1 and comparing the calculated values with the experiment

\bar{u}	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
\bar{u}/u_0	0,64	0,54	0,46	0,37	0,27	0,18	0,091
τ , с (эксперимент)	39	52	70	85	100	125	140
τ , с (8)	37,4	52,3	69,5	84,3	98,5	126	145
τ , с (9)	38,0	53,5	72,3	86,5	102	127	144
τ , с (10)	37,5	52,2	72,4	86,5	105	124,8	142

Погрешность в расчетах времени сушки по всем экспериментальным уравнениям не превышает 5 % и находится в пределах точности проведения эксперимента.

На основе уравнения кинетики сушки и уравнений потока тепла и скорости сушки в периоде падающей скорости А. В. Лыковым было получено выражение для отношения чисел Нуссельта в первом и втором периодах сушки [11, 12]

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{кр}} \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} (1 + Rb), \quad (11)$$

где $Nu_{кр}$, Nu , $\alpha_{кр}$, $\bar{\alpha}$ – соответственно критерии Нуссельта и коэффициенты теплоотдачи в первом и втором периодах сушки.

Устаноўлена, што каэфіцыенты теплоотдачи в период падаючай скорасці сушкі змяняюцца па эмпірычнай формуле [3, 4, 6, 12]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{\text{кр}}} = \left(\frac{\bar{u}}{u_{\text{кр}}} \right)^n. \quad (12)$$

Пастаянная n для тканей равна $n = 0,42$.

Для тканей, сушка которых протекает в период падаючай скорасці, учытваючы, што $u_p \approx 0$ и пренебрегая величиной числа Ребиндера, из уравнений (11) и (12) запишем

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т}}} = \frac{\bar{u} / u_0}{(\bar{u} / u_0)^n} = \left(\frac{\bar{u}}{u_0} \right)^{1-n} = \left(\frac{\bar{u}}{u_0} \right)^{0,58}. \quad (13)$$

Температура материала в процессе сушки тканей равна

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{н}}) \left(\frac{\bar{u}}{u_0} \right)^{0,58}, \quad (14)$$

где $t_{\text{н}}$ – начальная температура ткани, °С.

Аналитический расчет температуры для периода падаючай скорасці сушкі. Решение задач нестационарной теплопроводности при переменных теплофизических характеристиках твердого тела связано с большими трудностями. Поэтому для использования результатов решения линейных дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с постоянными коэффициентами переноса используют различные методы линеаризации, итерации и другие способы упрощения в решении нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности. Такие приближенные методы изложены в [9–13, 17].

Одним из возможных способов расчета нелинейного переноса тепла является метод итерации, который основан на кусочно-ступенчатой аппроксимации коэффициента переноса [9, 16, 18]. Сущность этого метода состоит в том, что при известном начальном распределении температуры в теле весь процесс сушки разбивается на большое число малых промежутков времени Δt . В дифференциальном уравнении теплопроводности производные по времени $\partial t / \partial \tau$ заменяются отношениями конечных приращений $\Delta t / \Delta \tau$ для каждого шага времени. Затем находится температура в узловых точках k при переходах от одного интервала времени к следующему в момент времени τ ; $\tau + \Delta t$ по значениям температур в узловых точках k с обеих сторон интервалов $\Delta t(k+1)$ и $(k-1)$.

Метод ступенчатой аппроксимации коэффициентов переноса ($\lambda_{\text{вл}}$, $c_{\text{вл}}$, $\bar{\alpha}$) с постоянными их значениями на расчетных промежутках времени Δt позволяет учитывать непрерывное скачкообразное изменение температуры по выбранному шагу времени Δt [13, 15, 17]. Этот метод допустимо использовать при малоинтенсивной сушке тканей, когда теплофизические характеристики в процессе сушки изменяются незначительно при переходе от интервала к интервалу и можно при определении коэффициентов теплообмена $\bar{\alpha}$ теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$, удельной теплоемкости $c_{\text{вл}}$ применять ступенчатую аппроксимацию этих коэффициентов с постоянными их значениями на расчетных временных интервалах [9, 17]. Таким образом, в процессе сушки фиксируется непрерывное изменение коэффициентов переноса.

Аналитические методы расчета кинетики сушки представляют интерес в связи с широким применением компьютерной техники и развитием численных решений систем дифференциальных уравнений.

Для ряда материалов с известными коэффициентами переноса возможно использовать результаты численных решений уравнений тепломассопереноса. В малоинтенсивных процессах, когда температура не претерпевает значительных изменений за малые промежутки времени, для тонких материалов тепломассообменные критерии Bi и Bi_m в реальных условиях сушки зависят друг от друга и принимают приблизительно одинаковые значения меньше единицы [3, 12, 13].

При малых значениях Bi и Bi_m главным лимитирующим фактором является внешний тепло-массообмен поверхности материала с окружающей средой. Сушка тонких материалов протекает при $Bi \ll 1$, малых градиентах температуры по сечению тела, и испарение влаги происходит у поверхности материала [3, 9, 17].

Неограниченная влажная тонкая пластина толщиной $\delta = 2R$ с начальной температурой t помещается в среду с постоянной температурой $t_c > t$. В начальный момент времени температура пластины одинакова по всему объему и равна начальной, между ограничивающими поверхностями пластины и окружающей средой происходит теплообмен по закону Ньютона.

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для пластины (все теплофизические коэффициенты в процессе постоянны) с учетом испарения из нее влаги только у поверхности пластины (внутренние стоки теплоты и фазовые превращения отсутствуют) имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

при граничных условиях

$$x = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0; \quad x = \pm R; \quad \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{\text{вл}}} (t_c - t) - \frac{\rho r R}{\lambda_{\text{вл}}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = 0,$$

где R – половина толщины пластины, м; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Решение дифференциального уравнения с заданными граничными условиями, учитывающими условия сушки при средних постоянных термических константах, имеет вид [18]

$$\Theta_{\text{ц}} = \frac{t_{\text{ц}} - t_{\text{н}}}{t_c - t_{\text{н}}} = 1 - \frac{A}{1 - \frac{Kc_{\text{вл}}\rho R}{\bar{\alpha}}} \exp(-K\tau). \quad (15)$$

Здесь $t_{\text{ц}}$ – температура в центре пластины, $^{\circ}\text{C}$.

При сушке тонких материалов $Bi \ll 1$ уравнение (15) представлено только одним членом ряда в бесконечной сумме членов ряда, представляющих решение линейной задачи нестационарной теплопроводности. Уравнение (15) справедливо, если коэффициент сушки K меньше параметра $m = \bar{\alpha} / c_{\text{вл}}\rho R$ ($K < m$).

Параметр A в уравнении (15) для периода падающей скорости выражается зависимостью [18]

$$A = \frac{Kr(\bar{u}_0 - u_p)R\rho}{\bar{\alpha}(t_c - t_{\text{н}})}. \quad (16)$$

Температуру в центре пластины можно определить, если воспользоваться уравнениями (3), (15), (16) при условии $m > K$ [15]:

$$t_{\text{ц}} = t_c - \frac{KrR\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{\text{вл}}\rho R}. \quad (17)$$

Уравнения (16) и (17) можно упростить, если воспользоваться параметром m . Для этого знаменатель в уравнениях (16) и (17) умножим и разделим на $c_{\text{вл}}\rho R$. В результате получим

$$A = \frac{Kr(\bar{u}_0 - u_p)R\rho}{\bar{\alpha}c_{\text{вл}}\rho R (t_c - t_{\text{н}})} = \frac{Kr(\bar{u}_0 - u_p)}{c_{\text{вл}}m(t_c - t_{\text{н}})}, \quad (18)$$

где $\bar{\alpha}/c_{\text{вл}}\rho R = m$. Таким образом,

$$t_{\text{ц}} = t_c - \frac{Kr(\bar{u} - u_p)R\rho}{\bar{\alpha}c_{\text{вл}}\rho R - Kc_{\text{вл}}\rho R} = t_c - \frac{Kr(\bar{u}_0 - u_p)}{c_{\text{вл}}(m - K)}. \quad (19)$$

Следует отметить, что при сушке таких тонких материалов, как ткань, бумага, фотоленка, температуры в центре и на поверхности совпадают со значением среднеинтегральной, поскольку градиент температуры равен нулю, термический перенос отсутствует и критерий Писнона $Pn = 0$.

В процессах сушки влагосодержание материала уменьшается, а температура увеличивается, поэтому коэффициенты $\lambda_{\text{вл}}$, а изменяются. Наибольшее изменение претерпевает коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$, коэффициент температуропроводности a изменяется незначительно, поскольку с уменьшением $\lambda_{\text{вл}}$ одновременно уменьшается произведение $c_{\text{вл}}\rho R$ примерно с такой же скоростью [9, 18]. Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ со снижением влагосодержания

уменьшается. Критерий $Bi = \bar{\alpha}R/\lambda_{вл}$ также изменяется мало, так как с уменьшением $\bar{\alpha}$ уменьшается и $\lambda_{вл}$ [9, 18].

Для вычисления числа $Bi = \bar{\alpha}R/\lambda_{вл}$ необходимо определять коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$. Для определения $\bar{\alpha}$ применялось уравнение для теплообменного числа Нуссельта [4]. Для процесса конвективной сушки тканей это уравнение имеет вид [4, 8, 12]

$$Nu = 0,89 Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_n} \right)^2 \left(\frac{\bar{u}}{u_0} \right)^{0,42}, \quad (20)$$

где T_c, T_n – соответственно абсолютные температуры среды и начальной ткани, °С

Вычисленные значения коэффициента $\bar{\alpha}$ даны в табл. 3 для режима сушки 1.

Т а б л и ц а 3. Значения параметров для определения температуры по аналитическим формулам (14) и (19) в процессе сушки шерстяной ткани

Table 3. Values of parameters for determining the temperature according to the analytical formulas (14) and (19) during the drying of woolen fabric

\bar{u}	$\bar{\alpha}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ (20)	$\lambda_{вл}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ (21)	Bi	$K, \text{с}^{-1}$ (5)	N^* (6)	$\bar{t}_n, \text{°С}$ (14)	$\bar{t}_c, \text{°С}$ (19)	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$ (2)
0,7	32,7	0,328	0,031	0,015	0,84	36,6	36,5	3226
0,6	30,8	0,289	0,032	0,016	0,79	37,5	37,0	3024
0,5	28,4	0,252	0,033	0,016	0,70	43,5	43,0	2800
0,4	25,7	0,212	0,035	0,017	0,64	46,5	46,0	2500
0,3	22,5	0,174	0,036	0,019	0,56	53,5	53,4	2260
0,2	19,2	0,135	0,038	0,020	0,46	62,5	63,0	1920

Примечание. Параметры ткани: толщина $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м; коэффициент теплопроводности сухой ткани $\lambda_0 = 0,046 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$; теплоемкость $c_0 = 1380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°С})$; плотность $\rho_0 = 240 \text{ кг}/\text{м}^3$. Режим сушки № 1, $t_c = 90 \text{ °С}$, скорость потока воздуха $\vartheta = 5,3 \text{ м}/\text{с}$, $\varphi = 5 \%$, $\bar{u}_0 = 1,12$; $u_p = 0,017$; $t_n = 20 \text{ °С}$; $N_{\max} = 0,0115 \text{ с}^{-1}$.

Влияние температуры и влажности на $\lambda_{вл}$ хорошо изучено [19, 20]. Коэффициент теплопроводности влажных тканей зависит от влажности и температуры, для шерстяных тканей он рассчитывается следующим образом [19]:

$$\lambda_{вл} = \lambda_0 + 0,0046W, \quad (21)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сухой ткани, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$; W – влагосодержание ткани, %. Влиянием температуры на $\lambda_{вл}$ в пределах до 80 °С для тканей можно пренебречь [19, 20].

В табл. 3 приведены основные результаты аналитических решений по температуре ткани и сопоставлению полученных значений температур со значениями, вычисленными по экспериментальным формулам (14) и (19).

Заключение. Представлен аналитический метод расчета температуры тканей на основе численных решений дифференциального уравнения теплопроводности для влажного тела.

Исследование сушки тканей на основе уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова и аппроксимация кривых скорости сушки по методам А. В. Лыкова, В. В. Красникова и формулы Н. С. Михеевой подтвердило достаточную точность определения длительности сушки тканей.

Полученные результаты исследования сушки тканей можно использовать в процессах сушки различных тонких влажных материалов, таких как ткань, бумага, фотопленка и др.

Список использованных источников

1. Процессы сушки и термовлажностной обработки в текстильной и легкой промышленности [Электронный ресурс] / М. Г. Балыхин [и др.] // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыковских научных чтений (22–23 сентября 2015 года). – 2015. – С. 193–205.
2. Кошелева, М. К. Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыковских научных чтений (22–23 сентября 2015 года). – 2015. – С. 205–210.

3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
4. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
7. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. – М.: Энергоиздат, 1952. – 263 с.
8. Ольшанский, А. И. Исследование процесса конвективно-радиационной сушки технических тканей методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносок // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 5. – С. 1113–1122.
9. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
10. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
11. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2013. – Т. 86, № 3. – С. 584–594.
12. 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.
13. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
14. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
15. Хрусталева, Б. М. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2. – 273 с.
16. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.
17. Рудобашта, С. П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов / С. П. Рудобашта // Инженер.-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705–714.
18. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1946. – 286 с.
19. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 345 с.
20. Франчук, А. У. Таблицы тепломеханических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 143 с.

References

1. Balykhin M. G., Yumenev K. E., Kosheleva M. K., Zakharova A. A. Processes of drying and heat-moisture treatment in textile and light industry. *Aktual'nye problemy sushki i termovlazhnostnoi obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse: sbornik nauchnykh statei Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh nauchnykh chtenii (22–23 sentyabrya 2015 goda)* [Actual problems of drying and thermal and moisture treatment of materials in various industries and the agro-industrial complex: Collection of scientific articles of the First International Lykov Scientific Readings (September 22–23, 2015)], 2015, pp. 193–205 (in Russian).
2. Kosheleva M. K., Rudobashta S. P. Features of the drying process of non-woven textile materials. *Aktual'nye problemy sushki i termovlazhnostnoi obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse: sbornik nauchnykh statei Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh nauchnykh chtenii (22–23 sentyabrya 2015 goda)* [Actual problems of drying and thermal and moisture treatment of materials in various industries and the agro-industrial complex: Collection of scientific articles of the First International Lykov Scientific Readings (September 22–23, 2015)], 2015, pp. 205–210 (in Russian).
3. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
4. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energia Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
5. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energia Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
6. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
7. Filonenko G. K., Lebedev P. D. *Drying Plants*. Moscow, Energia Publ., 1952. 263 p. (in Russian).
8. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V. Investigation of the convective-radiant drying of industrial fabrics by the regular-regime method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 5, pp. 1159–1169. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1117-y>
9. Rudobashta S. P. *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
10. Kavkazov U. L. *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
11. Ol'shanskii A. I. Heat transfer kinetics and experimental methods for calculating the material temperature in the drying process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 3, pp. 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>
12. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Kinetics of heat transfer during the desiccation of moist materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>
13. Lykov A. V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
14. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 535 p. (in Russian).

15. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P. *Heat and Mass Transfer. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2009. 273 p. (in Russian).
16. Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M. *Calculations of the Thermal Regime of Solid Bodies*. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 304 p. (in Russian).
17. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0394-3>
18. Lykov A. V., Auerman L. Ya. *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishchepromizdat Publ., 1946. 286 p. (in Russian).
19. Kolesnikov P. A. *Heat-Protective Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1965. 345 p. (in Russian).
20. Franchuk A. U. *Tables of Heat and Mechanical Indicators of Building Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ., 1969. 143 p. (in Russian).

Информация об авторах

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

Марущак Алексей Сергеевич – аспирант, ассистент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: alexeymarushak@mail.ru

Information about the authors

Anatolii I. Olshanskii – Ph. D. (Engineering), 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@vstu.by

Alexey S. Marushchak – Postgraduate Student, Assistant 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: alexeymarushak@mail.ru