

## НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ТКАНЕЙ

### A NEW METHOD FOR CALCULATING THE KINETICS OF THE DRYING PROCESS OF FABRICS

УДК 66.047.77

**А.И. Ольшанский, А.С. Марущак\***

*Витебский государственный технологический университет*

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-1-72-81>

**A. Alshanski, A. Marushchak\***

*Vitebsk State Technological University*

#### РЕФЕРАТ

**СУШКА, ТЕМПЕРАТУРА, ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ТЕПЛА, ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ, КОЭФФИЦИЕНТ СУШКИ, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ЧИСЛО БИО**

*Изложена новая методика расчета сушки тканей на основе уравнений кинетики сушки А.В. Лыкова и Г.К. Филоненко. Приведена обработка экспериментальных данных по конвективной и конвективно-радиационной сушке различных тканей. Даны уравнения для определения плотностей тепловых потоков, интенсивности испарения влаги, температуры для периода падающей скорости сушки. Представлены уравнения для определения длительности сушки тканей. Вычислены значения коэффициентов теплоотдачи и числа Био для различных тканей. Показано, что числа Био при сушке тканей меньше единицы, и основным лимитирующим фактором является внешний тепловлагообмен поверхности испарения влаги с поверхности материала с окружающей средой. Представлена проверка достоверности полученных расчетных уравнений и сопоставление расчетных значений с экспериментальными. Несовпадение значений находятся в допустимых пределах точности проведения и обработки эксперимента.*

#### ABSTRACT

**DRYING, TEMPERATURE, MOISTURE CONTENT, HEAT FLUX DENSITY, MOISTURE EVAPORATION RATE, DRYING COEFFICIENT, HEAT TRANSFER COEFFICIENT, THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT, BIO NUMBER**

*The article presents a new method for calculating the drying process of fabrics based on the A. Lykov's and G. Filonenko's equations of drying kinetics. Experimental data on convective and convective-radiation drying of various fabrics are processed. The equations are given for determining the densities of heat fluxes, the intensity of moisture evaporation, and the temperature for the period of falling drying rate. The equations for determining the duration of drying of fabrics are presented. The values of heat transfer coefficients and Bio numbers for different tissues are calculated. It is shown that the number of Bio when drying fabrics is less than one, and the main limiting factor is the external heat and moisture exchange of the surface of evaporation of moisture from the surface of the material with the environment. Verification of the reliability of the obtained computational equations and comparison of the calculated values with the experimental ones are presented. The mismatch values are within the acceptable limits of the accuracy of the experiment and processing.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Технология производства текстильных материалов характеризуется большим числом процессов, в которых сушка является необходимым процессом. Ткани после механического отжима в процессе сушки проходят целый ряд сложных

технологических операций, связанных с сушкой в технологической линии несколько раз, что связано со значительными затратами энергии на сушку [1, 2].

Совершенствование методов, обработки и сушки текстильных материалов связано с раз-

\* E-mail: [alexeymarushak@mail.ru](mailto:alexeymarushak@mail.ru) (A. Marushchak)

работкой энергоэффективных сушильных материалов, с поиском новых химических реагентов, позволяющих сократить время обработки материала, выбора оптимальных гидродинамических режимов, разработки оптимальных температурных и тепловлажностных режимов сушки на каждой стадии технологического цикла [1–4]. В промышленности для сушки тканей широко используется конвективная и комбинированная сушки. Для расчета процесса сушки и контроля за качеством высушиваемого материала необходимы простые, надежные методы расчета с минимальным количеством констант, определяемых экспериментально [3, 4].

**Цель исследования**

На основе опытных данных по сушке тканей различными способами подвода тепла разработать простой, надежный метод расчета кинетики сушки для определения основных параметров тепловлагопереноса.

**Кинетика сушки тканей**

Ткани после механического отжима выходят с влагосодержанием  $\bar{u}_0 = 1,1-1,3$ , и сушка предварительно обезвоженной ткани в отличие от большинства других тонких материалов сразу происходит в периоде убывающей скорости от начального влагосодержания  $\bar{u}_0$  и без периода постоянной температуры [4–7]. Связь между теплообменом и влагообменом устанавливается основным уравнением кинетики сушки А.В. Лыкова, которое при отсутствии периода постоянной скорости запишется [4, 7]:

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

где  $q, q_{\max}, \text{Вт/м}^2$  – плотность потока тепла в периоде падающей скорости, максимальный тепловой поток.

Относительная скорость сушки [3–5]:

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

Максимальная скорость сушки:

$$\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right)_{\max} = N_{\max} .$$

Число Ребиндера устанавливает связь теплообмена с влагообменом, и позволяет проводить расчет теплообмена по данным влагообмена без определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  [4, 5, 7].

При сушке тканей, как очень тонких материалов с толщиной  $\delta \approx 0,4 - 1,6 \text{ мм}$ , расход тепла на нагревание влажного тела значительно меньше тепла на испарение из него влаги, и числом  $Rb \ll 1$  и величиной  $Rb$  можно пренебречь [4, 6].

Для конвективной сушки балансовое уравнение тепла запишется в виде [4, 7]:

$$q = \alpha(t_c - t_n) = rj + c_{\text{вн}} \cdot \rho \cdot R_v \cdot \frac{d\bar{t}}{d\tau} ; \quad (3)$$

где  $\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  – коэффициент теплоотдачи в периоде падающей скорости;  $t_n, ^\circ\text{C}$  – температура на поверхности материала;  $r, \text{кДж/кг}$  – теплота парообразования;  $j, \text{гр/м} \cdot \text{с}$  – интенсивность испарения влаги в периоде падающей скорости;  $c_{\text{вн}}, \text{кДж/кг} \cdot \text{К}$  – удельная теплоемкость влажного тела;  $R_v = V / F$  – отношение объема тела к поверхности;  $d\bar{t} / d\tau$  – скорость изменения температуры.

Пренебрегая вторым членом в правой части уравнения (3), можно записать для плотности потока тепла в периоде убывающей скорости сушки [4, 7, 8]:

$$q = rj , \quad (4)$$

где  $j$  – интенсивность испарения влаги с поверхности материала в периоде убывающей скорости сушки.

Максимальная скорость сушки [4]:

$$N_{\max} = \left|\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right|_{\max} = K \cdot (\bar{u}_0 - u_p) , \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент сушки [4]:

$$K \approx \frac{N_{\max}}{u_0 - u_p}, \quad (6)$$

где  $u_p$  – равновесное влагосодержание материала.

Подставляя в (2) скорость сушки из уравнения (5) с учетом (6) в первом приближении, получим выражение для относительной скорости сушки для периода убывающей скорости с погрешностью 7–10 %:

$$N^* \approx \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p}. \quad (7)$$

Из решения общего уравнения кривой скорости сушки  $|d\bar{u} / d\tau| = N \cdot N^*$  Г.К. Филоненко [9] установил связь между теплообменом и влагообменом в виде уравнения:

$$\frac{t_c - t_n}{t_c - t_n} = N^*, \quad (8)$$

где  $t_n$  и  $t_c$  – начальная температура и температура среды.

Из уравнений (7) и (8) находится температура на поверхности тканей для конвективной сушки:

$$\bar{t} = t_n \approx t_c - (t_c - t_n) \times \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p}. \quad (9)$$

Температура  $\bar{t} = t_n$ , для тонких материалов, находится как среднеинтегральная для ткани.

Относительная скорость сушки  $N^*$  не зависит от режима сушки и для конкретного материала при заданном методе сушки является лишь функцией влагосодержания [3, 4, 5].

Максимальная интенсивность испарения влаги с поверхности материала определяется по максимальной скорости сушки  $N_{\max}$ :

$$j_{\max} = \rho_0 \times R_V \times N_{\max}. \quad (10)$$

Максимальная плотность теплового потока:

$$q_{\max} = r \times j_{\max}. \quad (11)$$

Текущие значения интенсивности испарения влаги и плотности тепловых потоков в первом периоде равны:

$$j = j_{\max} \times N^* = \rho \times R_V \times N_{\max} \times \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p}. \quad (12)$$

$$q = r \times \rho \times R_V \times N_{\max} \times \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p}. \quad (13)$$

Плотность теплового потока по уравнению теплообмена Ньютона [4,7]:

$$q = \bar{\alpha} \times (t_c - t_n), \quad (14)$$

где коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  определяется по критериальному уравнению для теплообменного критерия Нуссельта [4, 7].

Обработкой экспериментальных данных по сушке многих различных материалов была установлена связь между относительной скоростью сушки  $N^*$  и обобщенным временем  $N\tau$  [10]. При сушке материалов в периоде падающей скорости эта связь выражается уравнением [10]:

$$N^* = \frac{1}{N_{\max}} \times \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \exp(-a \times N_{\max} \times \tau), \quad (15)$$

где  $N_{\max}$ , %/ч – максимальная скорость сушки;  $\tau$ , (с) – время сушки от начального влагосодержания  $\bar{u}_0$ . Константа  $a$  определяется приближенным соотношением [10]:

$$a = \frac{0,8}{u_0}.$$

Интегрируя уравнение (15), получим длительность процесса сушки [10]:

$$\tau = -\frac{1}{a \times N_{\max}} \times \ln \left[ 1 - a \times (\bar{u}_0 - \bar{u}) \right], \quad (16)$$

где  $\bar{u}$  – текущее влагосодержание материала.  
Запишем уравнение (15) на основании (8):

$$\exp(-a \times N_{\max} \times \tau) = \frac{t_c - t_n}{t_c - \bar{t}}. \quad (17)$$

Решением (17) определяется температура материала в процессе сушки:

$$\bar{t} = t_n = t_c - (t_c - t_n) \times \exp(-a \times N_{\max} \times \tau). \quad (18)$$

Запишем уравнение (15) на основании (7) в виде:

$$\frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p} = \exp(-a \times N_{\max} \times \tau). \quad (19)$$

Длительность сушки тканей из решения (19):

$$\tau = \frac{1}{a \times N_{\max}} \times \left( 1 - \ln \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p} \right). \quad (20)$$

Секундный поток тепла на нагревание влажного тела по закону Ньютона [8]:

$$c_{\text{вл}} \times \rho \times R_V \times \frac{d\bar{t}}{d\tau} = a(t_c - \bar{t}), \quad (21)$$

где  $\frac{d\bar{t}}{d\tau}$  – скорость нагрева тела,  $\bar{t}$  – среднеинтегральная температура материала.

Запишем (21) и проинтегрируем [3, 8]

$$\frac{d\bar{t}}{t_c - \bar{t}} = \frac{\bar{a}}{c_{\text{вл}} \times \rho \times R_V} d\tau$$

$$\int_{t_n}^{\bar{t}} \frac{d\bar{t}}{t_c - \bar{t}} = \int_0^{\tau} m_t d\tau, \quad (22)$$

где  $\bar{a} / (c_{\text{вл}} \cdot \rho \cdot R_V)$  – темп нагрева влажного тела при значениях числа Био  $Bi \ll 1$  [6, 11].

Среднеинтегральная температура тканей из уравнения (22) равна:

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_n) \exp(-m_t \tau). \quad (23)$$

Темп нагрева тела  $m_t$  определяется экспериментально путем измерения температуры в любой точке тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима [6, 11]:

$$m_t = \frac{\ln \frac{t_c - t_1}{t_c - t_2}}{\tau_2 - \tau_1}, c^{-1}.$$

Текущие плотности тепловых потоков и интенсивность испарения влаги в периоде падающей скорости сушки при величине числа Рейндера  $Rb \rightarrow 0$  определяются выражениями:

$$q = q_{\max} \times N^* = q_{\max} \times \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p}. \quad (24)$$

$$j = \frac{q_{\max}}{r} \times \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p}. \quad (25)$$

Теплота парообразования  $r$  определяется по таблицам [3].

Для вычисления числа  $Bi$  и проверки достоверности обработки опытных данных и точности полученных эмпирических уравнений для определения коэффициента теплоотдачи  $\bar{a}$  использовалось уравнение для теплообменного числа Нуссельта [4–7]:

$$Nu = A \times Re^{0,5} \times \left( \frac{T_c}{T_{\text{м.т.}}} \right)^2 \times \left( \frac{T_{\text{изл}}}{T_c} \right)^{0,5} \times \left( \frac{\bar{u}}{u_0} \right)^n, \quad (26)$$

где  $Nu = \bar{a}l / \lambda_{\text{воз}}$  – критерий Нуссельта;  $Re = \rho l / \nu_{\text{воз}}$  – критерий Рейнольдса;  $T_c, T_{\text{м.т.}}, T_{\text{изл}}, K$  – абсолютные температуры среды, мокрого термометра, излучателя,  $l, m$  – длина материала

по набеганию потока воздуха,  $\lambda_{воз}$ ,  $Вт/м\cdot К$ ,  $\nu_{воз}$ ,  $м^2/с$  – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха определялись по таблицам,  $\vartheta$ ,  $м/с$  – скорость воздуха. Отношение  $(\bar{u} / u_0)^n$  – учитывает уменьшение коэффициента  $\bar{\alpha}$  с уменьшением влагосодержания ткани. Для сушки тканей коэффициент  $A = 0,89$ , постоянная  $n = 0,42$  [4, 6]. Комплекс  $T_{изл} / T_c$  учитывает увеличение коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  за счёт радиационного теплообмена.

Экспериментально установлено, что при радиационной сушке температура на поверхности материала за счёт излучения выше, чем при конвективной сушке при равных условиях сушки [4].

Число Био определяется соотношением:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}\delta}{\lambda_{тл}}$$

где  $\delta$ ,  $мм$  – толщина ткани.

Влияние температуры и влажности тканей на коэффициент теплопроводности тканей хорошо изучено [12, 13]:

Для шерстяных тканей  $\lambda_{тл} = \lambda_0 + 0,0026W$ .

Для льняной ткани  $\lambda_{тл} = \lambda_0 + 0,0039W$ ;

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности сухой ткани;  $W$  – влагосодержание ткани в %.

Влиянием температуры на  $\lambda_{тл}$  в пределах до  $80\text{ }^\circ\text{C}$  в материале можно пренебречь [12].

### Эксперимент

Режимы сушки даны в таблице 1.

На рисунке 1 (а, б) приведены кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  (а) и расчетные экспериментальные кривые  $t_p = f(\tau)$  (б) для процессов сушки шерстяных тканей для режимов сушки № 1 и № 3 по формулам (9) и (18).

На рисунке 2 даны кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $t_p = f(\tau)$  для конвективно-терморрадиационной сушки вискозной и льняной тканей при различных режимах сушки.

В таблицах 2, 3 и 4 дано сопоставление основных параметров сушки тканей с экспериментальными данными. Погрешность расчётных значений с учётом погрешностей при обработке опытных данных находится в допустимых пределах 5–7%.

### Заключение

Представлен метод расчета процесса сушки тканей. Даны необходимые формулы для определения всех основных кинетических характеристик процесса сушки тканей. Дана проверка достоверности полученных уравнений и сопоставление расчетных значений с экспериментальными. Разбежка значений находится в пределах точности проведения и обработки опытных данных.

Таблица 1 – Режимы для конвективной и конвективно-радиационной оценки тканей по кривым оценки представлены на рисунках 1 и 2

Режимы сушки	Конвективная сушка ткани				Конвективно-радиационная оценка ткани				
	Шерстяная ткань				Вискозная ткань			Льняная ткань	
	1	2	3	4	1	2	3	4	5
$u_0$	1,1	1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	1,36	1,30
$u_p$	0,02	0,016	0,018	0,04	0,03	0,02	0,015	0,02	0,02
$t_c, ^\circ\text{C}$	90	90	87	65	80	100	120	100	120
$t_{изл}, ^\circ\text{C}$	–	–	–	–	150	190	250	190	250
$\vartheta, м/с$	5	2,8	0,9	5,6	1	0,9	0,9	1,1	0,8
$\varphi, \%$	6	5	5	5	5	5	5	5	4
$N_{max}, с^{-1}$	0,016	0,0096	0,0073	0,0057	0,0031	0,0048	0,0068	0,0096	0,0176

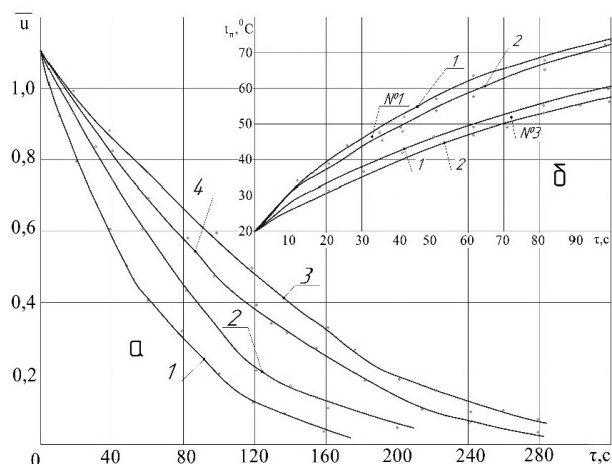


Рисунок 1 – Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  (а) и экспериментальные температурные кривые  $t_p = f(\tau)$  (б) для конвективной сушки шерстяных тканей. Температурные кривые для режимов № 1 и № 3 по формулам (9) и (18): 1 – по формуле (9), 2 – по (18)

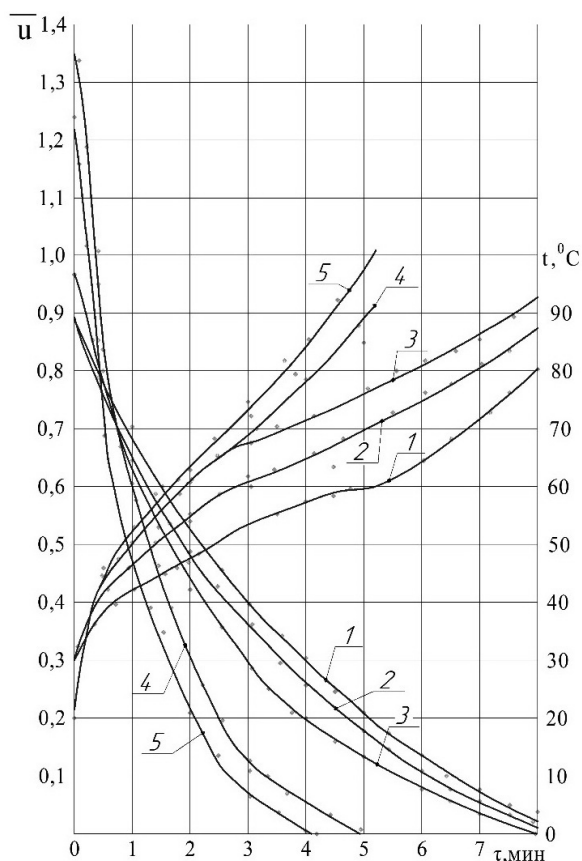


Рисунок 2 – Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и экспериментальные температурные кривые  $t_p = f(\tau)$  (указаны в таблице 2)

Таблица 2 – Значения основных параметров кинетики конвективной сушки шерстяных тканей для режимов № 1 и № 3 по формулам (26), (27), (14), (11), (13), (12), (9), (18)

**Шерстяная ткань, толщина  $\delta = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м;  $\rho_0 = 200$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_0 = 0,046$  Вт/м·°С. Режим сушки № 1.**  
 $t_c = 90$  °С;  $\vartheta = 5$  м/с;  $\varphi = 5$  %;  $t_{м.т.} = 42$  °С;  $\bar{u}_0 = 1,1$ ;  $u_p = 0,02$ ;  $t_n = 20$  °С;  $N_{макс} = 0,016$  с<sup>-1</sup>;  
 $\bar{\alpha} = 39,6$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $q_{макс} = 1920$  Вт/м<sup>2</sup>;  $j_{макс} = 0,8 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с

$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С (26)	$\lambda_{вл}$ , Вт/м·°С (27)	$Bi$	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (14)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (11)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (13)	$j$ , кг/м <sup>2</sup> ·с (12)	$t_n$ , °С (9)	$t_n$ , °С (18)	$\tau$ , с (экс)
0,8	34,6	0,238	0,058	1463	1440	1412	0,582	37,2	36,6	20
0,7	32,7	0,216	0,061	1228	1224	1222	0,508	43,6	42,2	35
0,6	30,7	0,199	0,064	1170	1057	1058	0,436	45,5	43,6	40
0,5	28,4	0,169	0,067	923	879	884	0,364	51,2	51,8	51
0,4	25,8	0,146	0,071	689	708	697	0,292	55,2	55,6	60
0,3	22,7	0,125	0,074	496	520	522	0,218	69,8	67,5	83
0,2	19,3	0,086	0,086	298	321	326	0,145	74,6	72,4	98

**Шерстяная ткань, толщина  $\delta = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м;  $\rho_0 = 200$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_0 = 0,046$  Вт/м·°С. Режим сушки № 3.**  
 $t_c = 87$  °С;  $\vartheta = 0,9$  м/с;  $\varphi = 6$  %;  $t_{м.т.} = 36$  °С;  $\bar{u}_0 = 1,1$ ;  $u_p = 0,016$ ;  $t_n = 20$  °С;  $N_{макс} = 0,0073$  с<sup>-1</sup>;  
 $\bar{\alpha} = 19,6$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $q_{макс} = 1152$  Вт/м<sup>2</sup>;  $j_{макс} = 0,48 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с

$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С (26)	$\lambda_{вл}$ , Вт/м·°С (27)	$Bi$	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (14)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (11)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (13)	$j$ , кг/м <sup>2</sup> ·с (12)	$t_n$ , °С (9)	$t_n$ , °С (18)	$\tau$ , с (экс)
0,8	17,2	0,237	0,028	778	826	838	0,35	42,7	38,7	50
0,6	16,3	0,211	0,032	596	622	629	0,26	50,5	48,6	92
0,5	14,9	0,172	0,035	458	504	502	0,22	56,2	54,5	120
0,3	12,6	0,126	0,036	286	302	314	0,134	62,0	59,3	160
0,2	10,5	0,081	0,048	187	210	212	0,087	70,2	69,4	200

Таблица 4 – Сопоставление длительности сушки тканей с экспериментальными значениями по формулам (16) и (20)

$u$	Ткань шерстяная. Режим сушки № 1. $N_{макс} = 0,016$ с <sup>-1</sup>			Ткань льняная. Режим сушки № 4. $N_{макс} = 0,011$ с <sup>-1</sup>			Ткань вискозная. Режим сушки № 1. $N_{макс} = 0,0041$ с <sup>-1</sup>		
	$\tau$ , с (экс)	$\tau$ , с (16)	$\tau$ , с (20)	$\tau$ , с (экс)	$\tau$ , с (16)	$\tau$ , с (20)	$\tau$ , с (экс)	$\tau$ , с (16)	$\tau$ , с (20)
0,8	20	20,9	20,7	45	45,5	47,4	36	38,2	36,2
0,6	40	39,6	41,1	72	73,4	72,3	92	89,6	88,7
0,4	60	60,7	63,2	111	115	112,6	182	184,4	180,4
0,2	98	96,4	109,8	190	189	186	310	310,4	313,3

Таблица 3 – Значения основных параметров кинетики конвективно-радиационной сушки льняной и вискозной тканей для режимов № 4 и № 1 по формулам (26), (27), (14), (11), (13), (12), (9), (18)

**Ткань льняная, толщина  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $\rho_0 = 200$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_0 = 0,046$  Вт/м·°С;  $c_0 = 1560$  Дж/кг·°С.  
 Режим сушки № 4.  $t_c = 100$  °С;  $t_{изл} = 190$  °С;  $\vartheta = 1,1$  м/с;  $\varphi = 5$  %;  $t_{м.т.} = 42$  °С;  $\bar{u}_0 = 1,36$ ;  $u_p = 0,02$ ;  
 $t_n = 20$  °С;  $N_{макс} = 0,0096$  с<sup>-1</sup>;  $\alpha = 28,7$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $q_{макс} = 1960$  Вт/м<sup>2</sup>;  $j_{макс} = 0,82 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с**

$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С (26)	$\lambda_{ал}$ , Вт/м·°С (27)	$Bi$	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (14)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (11)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (13)	$j$ , кг/м <sup>2</sup> ·с (12)	$t_n$ , °С (9)	$t_n$ , °С (18)	$t_n$ , °С (экс)	$\tau$ , с (экс)
1,1	24,5	0,241	0,053	1620	1584	1498	0,65	32	31	34	22
0,8	22,9	0,214	0,057	1310	1288	1143	0,52	42	43	43	45
0,6	20,4	0,185	0,059	1066	978	868	0,43	48	50	48	72
0,4	17,3	0,167	0,060	764	782	677	0,34	57	59	57	111
0,2	12,8	0,125	0,061	442	470	438	0,22	70	66	67	190
0,1	9,8	0,115	0,063	267	276	242	0,13	78	78	76	220

**Ткань вискозная, толщина  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $\rho_0 = 330$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_0 = 0,058$  Вт/м·°С;  $c_0 = 1610$  Дж/кг·°С.  
 Режим сушки № 1.  $t_c = 80$  °С;  $t_{изл} = 150$  °С;  $\vartheta = 1$  м/с;  $\varphi = 6$  %;  $t_{м.т.} = 38$  °С;  $\bar{u}_0 = 0,9$ ;  $u_p = 0,03$ ;  
 $t_n = 20$  °С;  $N_{макс} = 0,0031$  с<sup>-1</sup>;  $\alpha = 18,6$  Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $q_{макс} = 880$  Вт/м<sup>2</sup>;  $j_{макс} = 0,38 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>·с**

$\bar{u}$	$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С (26)	$\lambda_{ал}$ , Вт/м·°С (27)	$Bi$	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (14)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (11)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup> (13)	$j$ , кг/м <sup>2</sup> ·с (12)	$t_n$ , °С (9)	$t_n$ , °С (18)	$t_n$ , °С (экс)	$\tau$ , с (экс)
0,7	16,8	0,165	0,060	639	670	675	0,29	38	41	40	56
0,5	14,6	0,136	0,064	500	492	487	0,22	48	51	48	126
0,4	13,3	0,122	0,065	334	379	394	0,17	55	56	57	182
0,2	9,9	0,092	0,066	210	195	210	0,10	64	66	68	310
0,1	7,5	0,075	0,063	100	97	110	0,06	72	73	74	396

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Балыхин, М. Г., Разумеев, К. Э., Кошелева, М. К., Захарова, А. А. (2015), Процессы сушки и термовлажностной обработки в текстильной и лёгкой промышленности, *Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений*, 2015, С. 193–205.
2. Кошелева, М. К., Рудобашта, С. П. (2015), Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов, *Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений*, 2015, С. 205–210.

REFERENCES

1. Balyhin, M. G., Razumeev, K. Je., Kosheleva, M. K., Zaharova, A. A. (2015), Drying and heat-and-humidity treatment processes in the textile and light industry [Processy sushki i termo-vlazhnostnoj obrabotki v tekstil'noj i ljogkoj promyshlennosti], *Sbornik nauchnyh statej Pervyh Mezhdunarodnyh Lykovskih nauchnyh chtenij – Collection of scientific articles of the First International Lykov Scientific Readings*, 2015, pp. 193–205.
2. Kosheleva, M. K., Rudobashta, S. P. (2015), Featu-



3. Акулич, П. В. (2010), *Расчеты сушильных и теплообменных установок*, Минск, 443 с.
4. Лыков, А. В. (1968), *Теория сушки*, Москва, 472 с.
5. Васильев, В. Н., Куцакова, В. Е., Фролов, С. В. (2013), *Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса*, Санкт-Петербург, 224 с.
6. Ольшанский, А. И., Жерносек, С. В., Ольшанский В. И. (2014), Графоаналитический метод расчета конвективно-терморadiационной сушки технических тканей, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, № 26, С. 74
7. Ольшанский, А. И., Жерносек, С. В. (2014), Исследование процесса конвективно-радиационной сушки технических тканей методом регулярного режима, *Инженерно-физический журнал*, 2014, Т. 87, № 5, С. 1113–1122.
8. Лыков, А. В. (1972), *Тепломассообмен. Справочник*, Москва, 557 с.
9. Лыков, А. В. (1961), *Теоретические основы строительной теплофизики*, Минск, 519 с.
10. Филоненко, Г. К., Гришин, М. А., Коссек, В. К. (1971), *Сушка пищевых растительных материалов*, Москва, 439 с.
11. Ольшанский, А. И. (2013), Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки, *Инженерно-физический журнал*, 2013, Т. 86, № 3, С. 584–594.
12. Лыков, А. В., Михайлов, Ю. А. (1963), *Теория тепло- и массопереноса*, Москва, 536 с.
13. Колесников, П. А. (1965), *Теплозащитные свойства одежды*, Москва, 345 с.
14. Григорьев, И. С. (1991), *Физические величины. Справочник*, Москва, 1232 с.
3. Akulich, P. V. (2010), *Raschety sushil'nyh i teplo-obmennyyh ustanovok* [Calculations of drying and heat exchange plants], Minsk, 443 p.
4. Lykov, A. V. (1968), *Teorija sushki* [Drying theory], Moscow, 472 p.
5. Vasil'ev, V. N., Kucakova, V. E., Frolov, S. V. (2013), *Tehnologija sushki. Osnovy teplo- i massoperenosa* [Drying technology. Fundamentals of heat and mass transfer], Sankt-Peterburg, 224 p.
6. Ol'shanskij, A. I., Zhernosek, S. V., Ol'shanskij, V. I. (2014), Graphoanalytic method for calculating convective-thermoradiative drying of technical fabrics [Grafoanaliticheskij metod rascheta konvektivno-termoradiacionnoj sushki tekhnicheskikh tkanej], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2014, № 26, p. 74.
7. Ol'shanskij, A. I., Zhernosek, S. V. (2014), Investigation of the process of convective-radiation drying of technical fabrics by the regular mode method [Issledovanie processa konvektivno-radiacionnoj sushki tekhnicheskikh tkanej metodom reguljarnogo rezhima], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Engineering and Physics Journal*, 2014, Vol. 87, № 5, pp. 1113–1122.
8. Lykov, A. V. (1972), *Teplomassoobmen. Spravochnik* [Heat and mass transfer. Guide], Moscow, 557 p.
9. Lykov, A. V. (1961), *Teoreticheskie osnovy stroitel'noj teplofiziki* [Theoretical foundations of construction thermophysics], Minsk, 519 p.
10. Filonenko, G. K., Grishin, M. A., Kossek, V. K.

(1971), *Sushka pishhevyyh rastitel'nyh materialov* [Drying of food plant materials], Moscow, 439 p.

11. Ol'shanskij, A. I. (2013), Heat transfer kinetics and experimental methods for calculating the material temperature during drying [Kinetika teploobmena i jeksperimental'nye metody rascheta temperatury materiala v processe sushki], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Engineering and Physics Journal*, 2013, Vol. 86, № 3, pp. 584–594.
12. Lykov, A. V., Mihajlov, Ju. A. (1963), *Teorija teplo-i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer], Moscow, 536 p.
13. Kolesnikov, P. A. (1965), *Teplozashhitnye svojstva odezhdy* [Thermal protection properties of clothing], Moscow, 345 p.
14. Grigor'ev, I. S. (1991), *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Guide], Moscow, 1232 p.

*Статья поступила в редакцию 23. 03. 2021 г.*