

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНО-ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

А.И. Ольшанский, С.В. Жерносек,  
В.И. Ольшанский

УДК 66.047.37

### РЕФЕРАТ

*КОНВЕКТИВНО-ТЕРМОРАДИАЦИОННАЯ СУШКА, ТЕПЛОВЛАГООБМЕН, КИНЕТИКА, СКОРОСТЬ СУШКИ, РЕЖИМЫ, ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА*

*Объектом исследования является процесс конвективно-терморadiaционной сушки технических тканей.*

*Целью работы является установление основных закономерностей процесса сушки технических тканей, получение зависимостей для определения основных параметров процесса сушки и разработка графического метода расчета.*

*На основе теории регулярного теплового режима нагревания твердых тел авторами проведено исследование кинетики теплообмена в процессе сушки технических тканей при трех режимах: температурах излучателя 150, 190, 250°C ; температурах теплоносителя (воздуха) 80, 100, 120°C и скорости воздуха  $v \approx 0,8 - 1,1$  м/с. В результате исследования и обработки экспериментальных данных авторами установлены обобщенные зависимости для темпа нагревания влажных тканей и темпа убыли влагосодержания. Установлены закономерности изменения темпа удаления влаги из материала от начальной влажности тканей и скорости сушки в первом периоде. Получены эмпирические уравнения для расчета продолжительности процесса сушки и среднеинтегральной температуры в периоде падающей скорости.*

*Установлены закономерности изменения плотности тепловых потоков от текущего влагосодержания и времени сушки для заданных режимов. На основе полученных авторами результатов исследований разработан графический метод расчета основных параметров кинетики сушки тканей. Графический метод расчета позволяет определять все основные характеристики процесса сушки, не прибегая к расчет-*

### ABSTRACT

*THE COMBINED DRYING, METHOD OF A REGULAR MODE, DRYING SPEED, KINETICS, MODES, CURVE OF SPEED OF DRYING, GRAPHIC METHOD OF CALCULATION*

*The purpose of the work is research of drying process of fabrics with the combined electricity cable, a method of a regular thermal mode. The authors established dependences of heating rate of a damp body and a decrease of moisture content from the initial moisture content and main parameters of process of fabrics drying. Use of a regular mode method allows to carry out calculation of the main parameters of drying kinetics by a graphic method, which saves a lot of time on the settlement work. Without resorting to construction and integration of drying curve speed, it is possible to receive the experimental equations for calculation of main parameters of drying kinetics of fabrics and to carry out calculations by a graphic method.*

*On the base of the results of researches and processing of experimental data in the form of the empirical equations and the schedules generalized variables of process of drying are constructed.*

*The method of a regular thermal mode for the description of drying kinetics process can be used with success at various ways of energy supply to a material.*

ным уравнениям, определению коэффициентов теплообмена и интегрированию кривой скорости сушки, что значительно сокращает время на проведение эксперимента и объем расчетной работы.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко применяются декоративные многослойные материалы с использованием технических тканей, которые после специальной технологической обработки подвергаются сушке. Такие декоративные ткани используются в обувной промышленности, при производстве высококачественных обоев, при создании декоративно-отделочных покрытий в строительстве.

Ткани проходят технологическую обработку специальными полимерными аппретами и клеевыми пропитками для обеспечения жесткости и каркасности. Нанесение аппрета на ткань с одновременным увлажнением производится в плюсовочных ваннах, затем ткани подвергаются каландрированию для обеспечения равномерной влажности.

Сушка тканей термоизлучением относится к одним из перспективных методов термического обезвоживания материалов. Эффективность конвективно-терморadiационной сушки заключается в значительной интенсификации процесса влагообмена, обеспечивает высоко-темпе-

ратурный нагрев ткани, уменьшает миграцию красителей и аппретов и создает высокую интенсивность испарения влаги с поверхности материала за счет максимальной глубины проникновения инфракрасных лучей в ткань [1].

Графические методы широко используются при расчетах нагрева и охлаждения твердых тел, в процессах сушки зернистых и сыпучих материалов, в пневматических трубах-сушилках, в сушилках с кипящим слоем, аэрофонтанных сушилках. Расчеты по графикам и номограммам значительно сокращают время, трудоемкость и объем расчетной работы. Графики и номограммы строятся на основе обширного числа экспериментальных исследований и требуют достоверных данных по тепломассообменным и теплофизическим характеристикам различных материалов. Теплофизические характеристики тканей хорошо изучены и даны в таблице 1 [2].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сушка тканей проводилась на металлической поверхности стола экспериментальной установки в условиях вынужденного теплообмена. Ткань

Таблица 1 – Зависимость коэффициента температуропроводности для тканей от влажности

Вискоза $\lambda = 0,058 \text{ Вт / м} \cdot \text{°C}; c_0 = 1600 \text{ Дж / кг} \cdot \text{°C}$					Лен $\lambda = 0,046 \text{ Вт / м} \cdot \text{°C}; c_0 = 1500 \text{ Дж / кг} \cdot \text{°C}$				
W, %	$\lambda, \text{ Вт / м} \cdot \text{°C}$	$\rho, \text{ кг / м}^3$	$c, \text{ Дж / кг} \cdot \text{°C}$	$a \cdot 10^4, \text{ м}^2 / \text{ч}$	W, %	$\lambda, \text{ Вт / м} \cdot \text{°C}$	$\rho, \text{ кг / м}^3$	$c, \text{ Дж / кг} \cdot \text{°C}$	$a \cdot 10^4, \text{ м}^2 / \text{ч}$
90	0,187	759	2825	3,14	160	0,276	675	3150	4,67
80	0,173	713	2750	3,17	140	0,248	637	3060	4,58
60	0,144	640	2569	3,15	120	0,219	587	2960	4,537
50	0,13	600	2462	3,16	100	0,9	537	2840	4,49
40	0,116	556	2339	3,24	80	0,161	482	2690	4,48
20	0,087	488	2031	3,16	60	0,132	430	2500	4,47
10	0,072	453	1835	3,11	40	0,104	374	2260	4,1
					20	0,075	321	1946	4,32
					10	0,06	294	1744	4,27

располагалась параллельно близкому расположенным (250 мм) излучающим светлым источникам излучения. В качестве излучателей использовались лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома  $\varepsilon \approx 0,75 - 0,8$  и стекла  $\varepsilon \approx 0,85 - 0,9$ . При принятом расположении ткани от излучателей угловые коэффициенты излучения, определяющие эффективность поверхности излучения,  $\varphi = 1$ . Степень черноты тканей  $\varepsilon \approx 0,75 - 0,85$ . Исследование комбинированной сушки тканей проводилось с трехкратной повторяемостью эксперимента для каждого режима сушки для избежания ошибок и случайных результатов.

Сушка тканей проводилась при трех режимах при скорости воздуха  $v \approx 0,8 - 1,1$  м/с:

1.  $t_c = 80^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 150^\circ\text{C}$ ;
2.  $t_c = 100^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 190^\circ\text{C}$ ;
3.  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 250^\circ\text{C}$ .

На рисунке 1 представлены кривые сушки  $W = f(\tau)$  и температурные кривые  $t = f(\tau)$  при комбинированной сушке тканей из вискозы и льна для указанных режимов сушки. Видно, что сушка тканей протекает в периоде убывающей скорости как по влажностям, так и по температурам с кратковременным периодом прогрева тканей до  $t \approx 30 - 35^\circ\text{C}$  за 10 - 15 с.

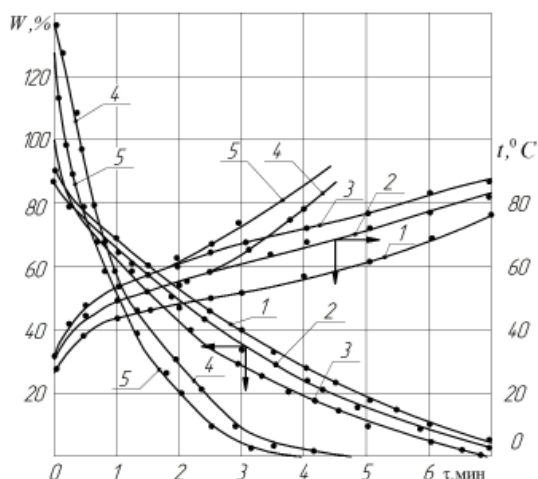


Рисунок 1 – Кривые сушки и температурные кривые для процесса сушки вискозной и льняной тканей при режимах сушки.

- Вискоза: 1.  $t_c = 80^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 150^\circ\text{C}$ ;  
 2.  $t_c = 100^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 190^\circ\text{C}$ ;  
 3.  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 250^\circ\text{C}$ ;  
 Лён: 4.  $t_c = 100^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 190^\circ\text{C}$ ;  
 5.  $t_c = 120^\circ\text{C}$ ;  $t_{uзн} = 250^\circ\text{C}$

Терморadiационная конвективная сушка тканей при принятом способе расположения материала на металлической поверхности за счет максимальной глубины проникновения излучения в ткань представляет крайне сложный процесс с переменной температурой на металлической поверхности стола, что вызывает дополнительный процесс кондуктивной сушки. Установлено [1], что влажность материала снижает глубину проникновения лучей только в периоде постоянной скорости сушки, когда поглощение излучения происходит с поверхности материала. Для тонких тканей с толщиной  $\delta \approx 0,8 - 1,2$  мм в результате проникновения излучения в ткань градиенты температуры и влажностного содержания совпадают по направлению, что значительно интенсифицирует процесс влагообмена [1].

Примечание:  $\lambda_0$  – теплопроводность сухой ткани;  $c_0, c$  – теплоемкости сухой и влажной ткани;  $\rho$  – плотность влажной ткани;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Механизм такой комбинированной сушки материалов – сложный процесс теплообмена и строгая математическая постановка задачи нахождение полей влажностного содержания и температуры на основе решения дифференциальных уравнений влаготеплопереноса – представляет большие трудности [1, 3, 4]. Поэтому задачу исследования комбинированной сушки тканей ограничиваем только исследованием внешнего механизма процесса сушки на основе обработки и анализа экспериментальных данных методом теории регулярного режима и обобщенных параметров процесса.

#### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ВЫВОД РАСЧЕТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Практикой сушки установлено, что интенсивность испарения влаги, плотность тепловых потоков и среднеинтегральные температуры влажного тела в периоде убывающей скорости сушки изменяются по экспоненциальным зависимостям. А. В. Лыков [3, 4] считает, что нагрев влажного тела при условии  $t_c = \text{const}$  в процессах сушки представляет собой регулярный режим, поскольку кривые сушки, температурные кривые и тепловые потоки являются экспонентами [4, 5]. В стадии регулярного режима изменение температуры и влажностного содержания выражаются линей-

ными соотношениями вида  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$  и  $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$ . Основным признаком регулярного режима для изменения температуры и влагосодержания являются соотношения

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m_t(t_c - \bar{t}); \quad (1)$$

$$-\frac{dW}{d\tau} = m_u(W_0 - W), \quad (2)$$

где  $d\bar{t}/d\tau$  и  $dW/d\tau$  – скорости изменения температуры и влагосодержания во времени;  $m_t$  и  $m_u$  – темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $t_c$  и  $\bar{t}$  – температура среды (теплоносителя) и среднеинтегральная температура материала;  $W_0$  и  $W$  – начальное и текущее влагосодержание, %;  $\tau$  – время сушки, мин.

Темп нагревания влажного тела  $m_t$  и темп удаления влаги  $m_u$  находятся экспериментально из соотношений [3 – 5]

$$\text{tg } \gamma = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_1) - \ln(t_c - \bar{t}_2)}{\tau_2 - \tau_1} = m_t; \quad (3)$$

$$\text{tg } \gamma = \frac{\ln(W_0 - W_2) - \ln(W_0 - W_1)}{\tau_2 - \tau_1} = m_u. \quad (4)$$

Отсчетом температуры влажной ткани для всех режимов принята температура  $t_0 \approx 30^\circ\text{C}$  от стадии прогрева тканей при  $\tau = 10 - 15$  с.

Из решения уравнений (1) – (4) находится время сушки тканей [5]:

$$\tau = \frac{1}{m_t} \ln \left( \frac{t_c - \bar{t}_0}{t_c - \bar{t}} \right); \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1}{m_u} \ln \left( \frac{W_0 - W_p}{W - W_p} \right). \quad (6)$$

Решением уравнения (5) определяется средняя температура тканей в процессе сушки [5]

$$\bar{t} = t_c - \frac{t_c - t_0}{\exp(m_t \tau)}. \quad (7)$$

В результате обработки опытных данных методом наименьших квадратов найдены значения  $m_t$  и  $m_u$  для тканей.

Величина темпа нагревания влажного тела  $m_t$  в условиях регулярного режима является постоянной для среднеинтегральных значений температуры и не зависит ни от режима сушки, ни от начального влагосодержания для тела заданной формы.

Темп убыли влагосодержания  $m_u$  является сложной функцией режима сушки и начального влагосодержания  $W_0$ . Режим сушки зависит от режимных параметров процесса, способа подвода теплоты, начального влагосодержания материала  $W_0$  и прочих факторов, влияющих на процесс. Следовательно, отношение максимальной скорости сушки  $N_{max} = (dW/d\tau)_{max}$  к начальному влагосодержанию  $W_0$  можно считать обобщенной переменной, учитывающей влияние всех факторов, воздействующих на процесс сушки.

Обработкой экспериментальных кривых сушки при начальных влагосодержаниях  $W_0$  85, 93, 100, 120, 130, 137 % и зависимости (4) установлены соотношения, отражающие влияние и связь темпа убыли влагосодержания  $m_u$  от режима сушки и начального влагосодержания  $W_0$ :

$$m_u = \frac{N_{max}}{W_0} = 8,7 \cdot 10^{-3} N_{max}$$

или

$$m_u = \frac{N_{max}}{W_0} = 8,7 \cdot 10^{-3} W_0 - 0,5. \quad (8)$$

Значение темпа нагревания влажных тканей  $m_t$ , вычисленное по зависимости (3) и опытных данных, приведенных на рисунке 2, оказалось равным  $m_t \approx 0,24 \text{ мин}^{-1}$ .

При решении задач по нагреванию твердых тел, решении дифференциальных уравнений теплообмена, теории регулярного режима, температура задается в безразмерной форме в виде соотношения [3, 4]

$$\Theta = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0}. \quad (9)$$

На рисунке 2 дана зависимость  $\text{lg } \Theta = f(\tau)$

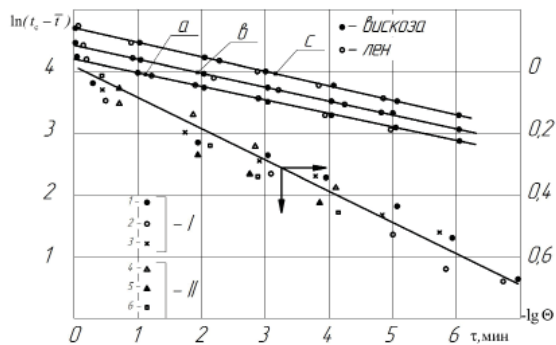


Рисунок 2 – Зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$  и  $\lg \Theta = f(\tau)$  для процесса сушки вязкой и льняной тканей при различных режимах. I и II:

1.  $t_c = 80^\circ\text{C}; t_{\text{узн}} = 150^\circ\text{C};$
2.  $t_c = 100^\circ\text{C}; t_{\text{узн}} = 190^\circ\text{C};$
3.  $t_c = 120^\circ\text{C}; t_{\text{узн}} = 250^\circ\text{C};$
- a.  $t_c = 80^\circ\text{C}; t_{\text{узн}} = 150^\circ\text{C};$
- б.  $t_c = 100^\circ\text{C}; t_{\text{узн}} = 190^\circ\text{C}$
- с.  $t_c = 120^\circ\text{C}; t_{\text{узн}} = 250^\circ\text{C}$

для процесса сушки вязкой и льняной тканей. Обработка этой зависимости дала выражение

$$\Theta = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0} = \exp(-0,24\tau). \quad (10)$$

Значение темпа нагревания  $m_t$  при обработке эксперимента по зависимости (3)  $m_t = 0,24$  совпадает со значением коэффициента в уравнении (10), что подтверждает равенство темпа нагревания  $m_t$  для вязкой и льняной тканей.

Для практики сушки представляет значительный интерес обработка экспериментальных данных в обобщенных переменных, позволяющих, независимо от режима сушки, выявлять наиболее общие закономерности кинетики сушки и значительно сокращать число трудоемких и сложных экспериментов. На основе зависимости (8) и произведения  $m_u \cdot \tau$  можно построить обобщенную кривую сушки, аналогичную обобщенной кривой сушки Ф. К. Филоненко в координатах  $W - W_p = f(N \cdot \tau)$ , где  $W_p$  – равновесное влагосодержание;  $N$  – скорость сушки в первом периоде, и на основе обобщенных переменных процесса проводить графический расчет основных параметров кинетики сушки влажных тканей.

На рисунке 3 б дана зависимость  $W_p = f(m_u \cdot \tau)$  для процесса сушки исследуемых тканей в диапазоне влагосодержаний  $W_0 \approx 90 - 137\%$  при равновесном влагосодержании  $W_p = 0$ .

Все опытные точки удовлетворительно ложатся на одну кривую для всех режимов сушки. В результате обработки эксперимента получено уравнение

$$W = W_0 \exp(-m_u \cdot \tau), \quad (11)$$

где темп убыли влагосодержания  $m_u$  находится по выражениям (8).

Из уравнения (11) находится время сушки от начального влагосодержания  $W_0$  до равновесного  $W_p \approx 0$ .

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \cdot \ln \frac{W - W_p}{W_0 - W_p}. \quad (12)$$

Температурные кривые для процесса сушки тканей (рисунок 1) при построении в координатах  $t = f(m_t \cdot \tau)$  представляют прямые, выражаемые простыми линейными зависимостями, изображенными на рисунке 4. Для расчета среднеинтегральной температуры получено уравнение

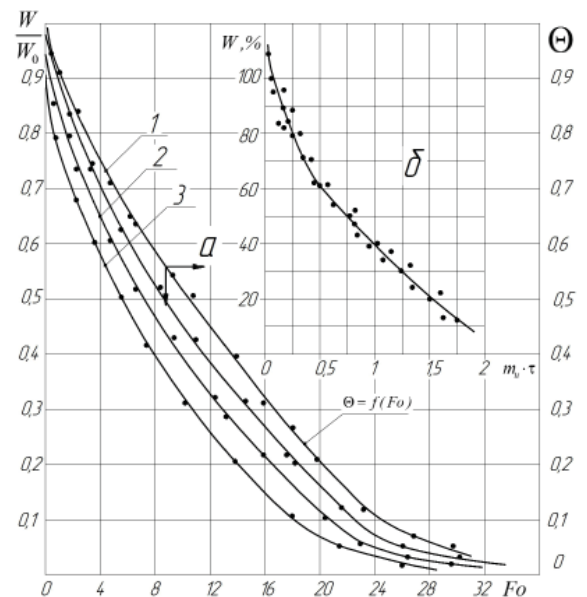


Рисунок 3 – Обобщенные зависимости  $W / W_0 = f(Fo)$ ;  $\Theta = f(Fo)$  и  $W = f(m_u \cdot \tau)$  для процесса сушки вязкой и льняной тканей при режимах, указанных на рисунке 2



$$\bar{t} = 0,24t_c + 30m_1\tau \quad (13)$$

Рассмотрим два варианта построения графиков для расчета основных параметров кинетики сушки тканей.

На рисунке 5 а представлены зависимости  $\Theta = f(\tau)$  и обобщенные кривые сушки  $W/W_0 = f(\tau)$  для процесса сушки тканей.

Графический расчет кинетики сушки тканей проводится по заданному текущему значению  $W$ . Находится время сушки, относительная  $\Theta$  и средняя температура  $\bar{t}$  в процессе. По второму варианту строятся зависимости  $W/W_0 = f(Fo)$  и  $\Theta = f(Fo)$  для каждого режима сушки тканей, где критерий Фурье  $Fo = a\tau / R_v^2$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $R_v$  – характерный размер влажного материала, равный толщине ткани  $\delta$ .

На рисунке 3 а изображены зависимости  $W/W_0 = f(Fo)$  и  $\Theta = f(Fo)$  для процесса сушки тканей для заданных режимов. Графический расчет по рисунку 3 а проводится в такой же последовательности, как и по рисунку 5 а с опре-

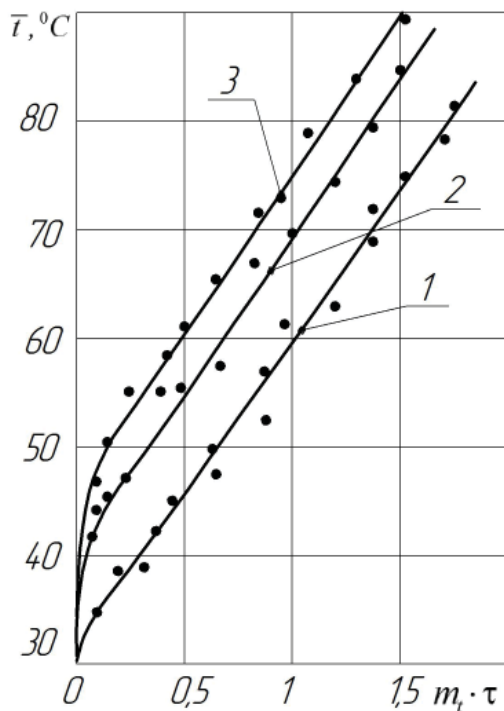


Рисунок 4 – Зависимости среднеинтегральной температуры  $\bar{t} = f(m_1 \cdot \tau)$  для процесса сушки тканей при режимах, указанных на рисунке 1

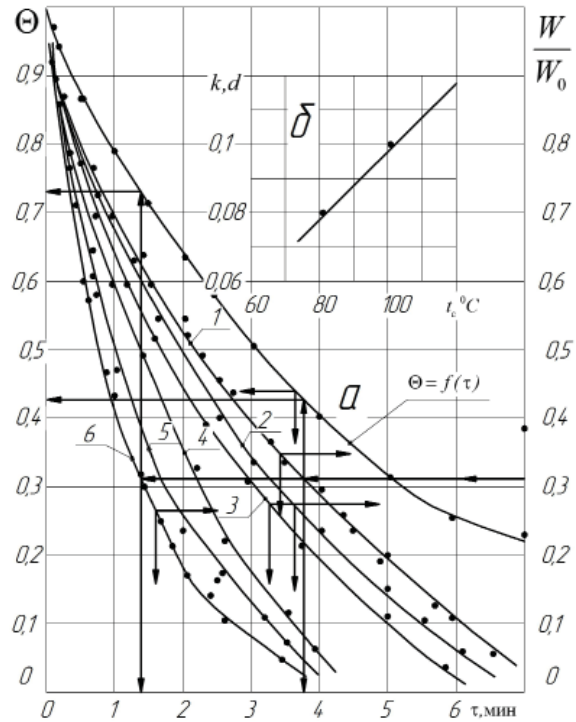


Рисунок 5 – Рисунок 5 (а, б) – Обобщенные кривые сушки  $W/W_0 = f(\tau)$  и температурная кривая  $\Theta = f(\tau)$  для процесса сушки тканей и зависимость постоянных  $k, d$  от температуры среды  $t_c$ . (Режимы указаны на рисунке 2)

делением времени сушки  $\tau$  по критерию Фурье  $Fo$ , относительной  $\Theta$  и средней температуры  $\bar{t}$  в процессе по значениям  $W/W_0 = f(Fo)$ . Анализ данных таблицы 1 показал, что при заданном характерном размере  $R_v = \delta \approx 0,8 - 1,2$  мм для тканей величина комплекса  $a / R_v^2$  в критерии  $Fo$  принимает вполне определенные значения: для вязкой ткани  $a / R_v^2 \approx 0,06$ , для льняной  $a / R_v^2 \approx 0,16$  и критерий Фурье соответственно принимает значения  $Fo \approx 0,06\tau$  и  $Fo \approx 0,16\tau$ , где время  $\tau$  в секундах, а графический расчет кинетики сушки упрощается.

Обработкой эксперимента для процесса сушки тканей методом наименьших квадратов получены расчетные уравнения

$$\frac{W}{W_0} = \exp(-k Fo), \quad (14)$$

$$\Theta = \exp(-d Fo), \quad (15)$$

где значения коэффициентов  $k$  и  $d$  совпадают и находятся по зависимости  $[k], d = 1 \cdot 10^{-3} t_c$ .

Закономерности изменения коэффициентов  $k$  и  $d$  в уравнениях (14) и (15) даны на рисунке 5 б.

При графическом расчете кинетики сушки тканей по рисунку 3 а длительность сушки вискозной ткани находится как  $\tau \approx Fo / 0,06$ , льняной  $\tau \approx Fo / 0,16$ , где время  $\tau$  в секундах.

Для более полного описания кинетики сушки влажных материалов необходимо знать закономерности изменения тепловых потоков  $q$  как функцию  $q = f(\tau, W)$ .

Для избежания ошибок и неточностей при обработке эксперимента вычисление тепловых потоков производилось по двум независимым формулам.

Тепловые потоки в процессе сушки определялись по уравнению теплообмена

$$q = \bar{\alpha}_k (t_{изл} - t_n), \quad (16)$$

где  $\bar{\alpha}_k$  – коэффициент теплообмена в процессе сушки Вт/(м<sup>2</sup>°C);  $t_n$  – температура поверхности материала, °C.

Коэффициент теплообмена  $\bar{\alpha}_k$  вычислялся по критериальному уравнению [6]

$$Nu = 0,87 Re^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_n}\right)^2 \cdot \left(\frac{T_{изл}}{T_c}\right)^{0,45} \cdot \left(\frac{W}{W_0}\right)^{0,5}, \quad (17)$$

где  $Nu = \bar{\alpha} l / \lambda_{воз}$  – критерий Нуссельта;  $\lambda_{воз}$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $l$  – длина образца ткани по набеганию потока воздуха;  $T_c, T_{изл}, T_n$  – абсолютные температуры среды, излучателя и мокрого термометра; критерий Рейнольдса  $Re = Wl / \nu_{воз}$ ;  $W$  – скорость воздуха,  $\nu_{воз}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

С другой стороны, тепловые потоки определялись по формуле излучения Стефана-Больцмана с поправкой на конвекцию [6, 7]:

$$q_{изл} = (\varepsilon_{np} + \varepsilon_k) \cdot C_0 \left[ \left(\frac{T_{изл}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 \right] \cdot \varphi \cdot \left(\frac{W}{W_0}\right)^{0,5} \quad (18)$$

Угловой коэффициент излучения  $\varphi = 1$ .

Отношение  $(W / W_0)^{0,5}$  поправка на уменьшение коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}_k$  и тепловых потоков  $q$  с уменьшением влагосодержания  $W$ .

Приведенная степень черноты системы находится из выражения

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \varphi(1/\varepsilon_2 - 1)},$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – степени черноты поверхностей излучателя и ткани.

Участие конвективного теплообмена учитывается увеличением степени черноты системы за счет конвекции

$$\varepsilon_k = \frac{\alpha_k (t_c - t_n)}{C_0 \left[ \left(\frac{T_{изл}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 \right]},$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплообмена, определяемый формулой (17), Вт/(м<sup>2</sup>°C);  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>).

Расчеты показали суммарное значение  $(\varepsilon_{np} + \varepsilon_k) \approx 0,59 - 0,62$  для всех режимов сушки тканей. Несовпадение значений тепловых потоков, вычисленных по формулам (16) и (18), находятся в пределах точности проведения эксперимента.

На рисунке 6 дана зависимость тепловых потоков  $q$  от влагосодержания  $W$  и времени сушки  $\tau$ , полученная совместной обработкой эксперимента по уравнениям (16), (18) и кривых сушки тканей (рисунок 1). График, представленный на рисунке 6, может использоваться совместно с графиками на рисунке 3 и рисунке 5 при графическом расчете кинетики сушки тканей.

Плотность тепловых потоков находится по формуле

$$q = m \cdot \exp(0,016 W), \quad (19)$$

$$m = \left( 1,7 - 1,6 \left( \frac{T_0}{T_{изл}} \right) \right) \cdot 10^3.$$

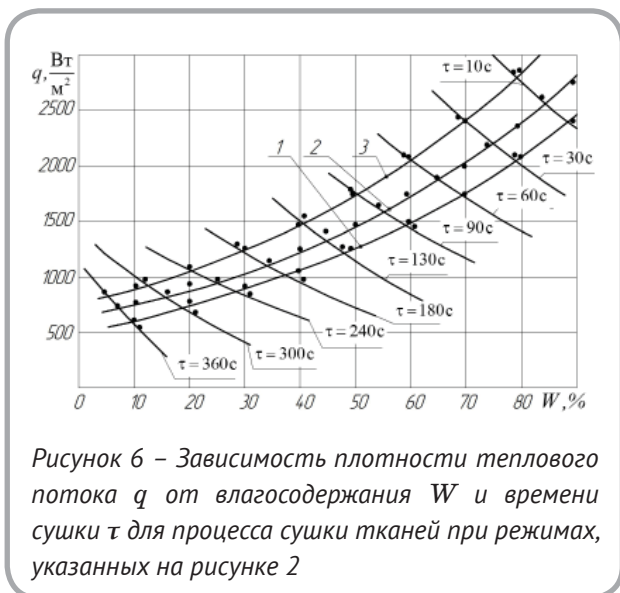


Рисунок 6 – Зависимость плотности теплового потока  $q$  от влагосодержания  $W$  и времени сушки  $\tau$  для процесса сушки тканей при режимах, указанных на рисунке 2

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

На точность эмпирических уравнений, полученных на основе эксперимента, накладываются неизбежно ошибки, полученные при проведении и обработке эксперимента. Обработка экспериментальных данных проводилась наиболее точным методом, методом наименьших квадратов с минимальным разбросом опытных точек. Сопоставление результатов расчетных значений параметров, полученных по эмпирическим формулам, с экспериментом дано в таблицах.

В таблице 2 приведено сравнение расчетных значений времени сушки  $\tau$  тканей из вискозы и льна с экспериментом, а в таблице 3 дано сопоставление расчетных значений среднеинтегральной температуры с экспериментом. Точность эмпирических уравнений находится в границах ошибки при проведении эксперимента. Обработку эксперимента в виде зависимостей, изображенных на рисунке 4, можно считать номограммой, поскольку при этом используются геометрические, внутренние и внешние характеристики теплопереноса, критерии подобия и обобщенные переменные.

### ВЫВОДЫ

Исследование процесса сушки тканей с комбинированным энергоподводом методом регулярного теплового режима позволяет, не прибегая к построению и интегрированию кривой скорости сушки, получить экспериментальные уравнения для расчета основных параметров

кинетики сушки тканей и проводить расчеты графическим методом.

Установлены зависимости темпа нагревания влажного тела  $m_t$  и темпа убыли влагосодержания  $m_u$  от начального влагосодержания  $W_0$  и основных параметров процесса сушки тканей. Использование метода регулярного режима дает возможность проводить расчет основных параметров кинетики сушки графическим методом по графикам, что позволяет значительно экономить время на проведение расчетной работы.

Результаты исследований и обработки экспериментальных данных в виде эмпирических уравнений и графиков, построенных на основе обобщенных переменных процесса сушки, могут использоваться в инженерной практике при расчетах конвективно-терморadiационной сушки тканей.

Метод регулярного теплового режима для описания кинетики процесса сушки может с успехом использоваться при различных способах подвода энергии материалу.



Таблица 2 – Сравнение расчетных значений времени сушки  $\tau$  для тканей из вискозы и льна по уравнениям (5), (6), (12) и графикам рисунка 3 и рисунка 5 с экспериментом при разных режимах сушки

<b>Вискоза. Режим сушки <math>t_c = 80^\circ\text{C}</math>; <math>T_{\text{изл}} = 423 \text{ K}</math></b>						
<b>W, %</b>	<b><math>\tau_{\text{экс}}, \text{C}</math></b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (6)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (12)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (5)</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 3</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 5</b>
70	62	58	57	64	64	66
60	88	86	85	91	90	88
40	178	169	163	175	175	180
20	303	302	289	310	295	293
10	420	413	416	425	409	412
<b>Вискоза. Режим сушки <math>t_c = 100^\circ\text{C}</math>; <math>T_{\text{изл}} = 463 \text{ K}</math></b>						
<b>W, %</b>	<b><math>\tau_{\text{экс}}, \text{C}</math></b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (6)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (12)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (5)</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 3</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 5</b>
70	62	58	57	64	64	66
60	88	86	85	91	90	88
40	178	169	163	175	175	180
20	303	302	289	310	295	293
10	420	413	416	425	409	412
<b>Вискоза. Режим сушки <math>t_c = 120^\circ\text{C}</math>; <math>T_{\text{изл}} = 523 \text{ K}</math></b>						
<b>W, %</b>	<b><math>\tau_{\text{экс}}, \text{C}</math></b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (6)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (12)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (5)</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 3</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 5</b>
70	46	51	42	49	43	42
60	61	57	65	68	69	65
40	138	141	132	129	128	132
20	218	224	225	220	221	222
10	295	305	298	310	306	306
<b>Лен. Режим сушки <math>t_c = 100^\circ\text{C}</math>; <math>T_{\text{изл}} = 463 \text{ K}</math></b>						
<b>W, %</b>	<b><math>\tau_{\text{экс}}, \text{C}</math></b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (6)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (12)</b>	<b><math>\tau_{\text{рас}}, \text{C}</math> (5)</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 3</b>	<b><math>\tau_{\text{граф}}, \text{C}</math> рис. 5</b>
80	45	43	43	41	42	43
60	62	64	65	59	62	59
40	95	95	96	89	93	87
20	149	154	155	145	150	146
10	198	205	207	189	191	189

Таблица 3 – Сравнение расчетных значений среднеинтегральной температуры  $\bar{t}$  при сушке тканей из вискозы и льна по уравнениям (7), (10), (13), (15) и графикам рисунка 3 и рисунка 5 с экспериментом

Вискоза. Режим сушки $t_c = 80^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{изл}} = 423 \text{ K}$								
W, %	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\bar{t}_{\text{экс}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (7)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (13)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (15)	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 3	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 5
70	1,06	40	42	42	42	43	41	42
60	1,46	46	46	45	44	47	44	46
40	1,98	55	55	55	52	52	54	55
20	5,07	67	65	65	68	68	63	66
10	7	73	71	72	74	74	70	473
Вискоза. Режим сушки $t_c = 100^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{изл}} = 463 \text{ K}$								
W, %	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\bar{t}_{\text{экс}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (7)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (13)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (15)	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 3	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 5
70	0,77	46	42	42	47	44	44	44
60	1,31	53	50	50	52	54	49	51
40	2,57	66	62	6	61	68	62	3
20	4,41	76	72	72	73	78	73	77
10	6	80	77	78	83	82	82	85
Лён. Режим сушки $t_c = 100^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{изл}} = 463 \text{ K}$								
W, %	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\bar{t}_{\text{экс}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (7)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (13)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (15)	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 3	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 5
80	0,76	47	45	46	43	–	44	45
60	1,1	51	48	51	49	–	49	55
40	1,5	54	52	55	54	–	58	62
20	2,5	62	61	67	62	–	69	70
10	3,3	67	68	73	66	–	76	78
Лён. Режим сушки $t_c = 120^\circ\text{C}$ ; $T_{\text{изл}} = 523 \text{ K}$								
W, %	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\bar{t}_{\text{экс}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (7)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (13)	$\bar{t}_{\text{рас}}, ^\circ\text{C}$ (15)	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 3	$\bar{t}_{\text{граф}}, ^\circ\text{C}$ рис. 5
80	0,51	49	46	46	45	–	45	46
60	0,76	52	51	51	49	–	49	55
40	1,24	56	55	55	54	–	58	61
20	2	64	67	67	63	–	68	70
10	2,5	72	74	74	68	–	77	79

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А.В. (1968). Теория сушки, Москва, Энергия, 472 с.
2. Колесников, П.А. (1965). Теплозащитные свойства одежды, Москва, Легкая индустрия, 340 с.
3. Лыков, А.В. (1967). Теория теплопроводности, Москва, Высшая школа, 600 с.
4. Лыков, А.В. (1961). Теоретические основы строительной теплофизики, Минск, Издательство Академии наук БССР, 520 с.
5. Ольшанский, А.И., Ольшанский, В.И. (2011). «Исследование процесса сушки тонких материалов методом регулярного режима», Весті НАН Беларусі. Серія фізіка-тэхнічэскіх навук, № 2, С. 75 – 81.
6. Ганин, Е.А. (1989). Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности, Москва, Легпромбытиздат, 392 с.
7. Михеев, М.А., Михеева, И.М. (1979). Основы теплопередачи, Москва, Энергия, 344 с.

## REFERENCES

1. Lykov, A.V. (1968), Drying theory [Teorija sushki], Moscow, Energy, 472 p.
2. Kolesnikov, P.A. (1965), Heat-shielding properties of clothes [Teplozashhitnye svojstva odezhdy], Moscow, 340 p.
3. Lykov, A.V. (1967), Heat conductivity theory [Teorija teploprovodnosti], Moscow, 600 p.
4. Lykov, A.V. (1961), Theoretical fundamentals of construction thermophysics [Teoreticheskie osnovy stroitel'noj teplofiziki], Moscow, 520 p.
5. Ol'shanskij, A.I. (2011), Probe of process of drying of thin materials by a method of a regular mode [Issledovanie processa sushki tonkih materialov metodom reguljarnogo rezhima], Vesti Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk – Vestie of National academy of Sciences of Belarus. Series of physics and technology sciences, pp. 75-81.
6. Ganin, E.A. (1989), Heat using installations in the textile industry [Teploispol'zujushhie ustanovki v tekstil'noj promyshlennosti], Moscow, 392 p.
7. Miheev, M.A., Miheeva, I.M. (1979), Heat transfer bases [Osnovy teploperedachi], Moscow, 344 p.

*Статья поступила в редакцию 14. 11. 2013 г.*