

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ТЕПЛОПЛОМАССОБМЕНА

А.И. Ольшанский, С.В. Жерносек

УДК 66.047:536.248

РЕФЕРАТ

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, КРИТЕРИЙ НУС-СЕЛЬТА, КРИТЕРИЙ БИО, КРИТЕРИЙ БОЛЬЦМАНА, КРИТЕРИЙ КОНДРАТЬЕВА, КРИТЕРИЙ КОССОВИЧА, ТЕМП НАГРЕВАНИЯ ВЛАЖНОГО ТЕЛА, ТЕМП УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ, СКОРОСТЬ СУШКИ

Объектом исследования является процесс истечения вязкой несжимаемой жидкости через плоское щелевое отверстие под действием сил гидростатического давления.

Целью работы является определение основных закономерностей истечения жидкого полимера через плоское щелевое отверстие и определение взаимосвязи между скоростью истечения, гидростатическим давлением и геометрическими параметрами плоской щели.

Установлено, что изменение скорости течения вязкой несжимаемой жидкости при ламинарном режиме подчиняется параболическому закону. Приведенные аналитические зависимости позволяют определить величину гидростатического давления для обеспечения необходимой производительности и толщины покрытия при производстве различных искусственных материалов.

ABSTRACT

INTEGRAL TEMPERATURE, MEASURE OF NUSSELT, MEASURE OF BIOT, MEASURE OF BOLZMANN, MEASURE OF KONDRATIEVA, MEASURE OF KOSSOVICH, THE RATE OF HEATING WET BODY, THE RATE OF REMOVAL OF MOISTURE, THE SPEED OF DRYING

The results of the research of fabrics drying by thermo-radiation methods of similarity theory of heat mass exchange and regular heating mode of wet bodies at a constant temperature of the heat carrier are presented in this article. It allows to obtain the empirical equations for calculation of the main characteristics of fabrics drying kinetics on the basis of the Boltzmann's radiation measure. The rate of heating of wet body and rate of loss moisture were determined. The proposed method of research can be used for the calculation of drying kinetics of various wet materials and saves time and money for carrying out the experiment and reduces the amount of computational work.

ВВЕДЕНИЕ

Сушка тканей термоизлучением является одним из эффективных способов термического обезвоживания материалов. За счет интенсификации процесса сушки и возникающих больших удельных тепловых потоков получают значительный технологический и экономический эффект [1]. Эффективность терморadiационной сушки заключается еще и в том, что оно обеспечивает высокотемпературный нагрев ткани, уменьшается миграция красителей и аппретов, при этом наблюдается высокая интенсивность испарения влаги с поверхности материала за счет максимальной глубины проникновения лучей в ткань

и обеспечивается высокое качество обрабатываемого продукта [1]. Предварительно перед сушкой ткани проводят технологическую обработку специальными полимерными аппретами и клеевыми пропитками для обеспечения жесткости и каркасности. Нанесение аппретов на ткань с одновременным увлажнением производится в плюсовочных ваннах. Затем ткани подвергаются каландрированию для обеспечения равномерной влажности и поступают на сушку.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сушка технических тканей производилась на металлической поверхности стола экспери-

ментальной установки при вынужденном движении воздуха. Ткань располагалась параллельно от близко расположенных (250 мм) светлых источников излучения. В качестве излучателей использовались лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома $\epsilon_1 \approx 0,82 \div 0,90$, стекла $\epsilon_2 \approx 0,82 \div 0,92$. При принятом расположении ткани от излучателей угловые коэффициенты излучения φ , характеризующие эффективность излучения $\varphi = 1$. Степень черноты натуральных тканей $\epsilon_m \approx 0,75 \div 0,80$.

Исследование комбинированной конвективно-терморрадиационной сушки тканей проводилось с трехкратной повторяемостью эксперимента для каждого режима с целью получения достоверных результатов. Сушка тканей проводилась при трех режимах: 1). $t_{uзн} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; 2). $t_{uзн} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; 3). $t_{uзн} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость воздуха $v = 0,8 \div 1,1 \text{ м/с}$.

Решение системы уравнений тепломассопереноса дает зависимость процесса сушки от большой группы тепломассообменных критериев подобия. Однако не все критерии в одинаковой мере влияют на характер протекания процесса сушки [2]. В условиях терморрадиационной сушки тканей для безразмерной избыточной температуры можно записать

$$T^* = f(X, Fo, Bi, Rb, Bo, \epsilon, Ko, Pd, Pn, \Psi, \Gamma),$$

где T^* – относительная избыточная температура материала; X – безразмерная координата; Fo – критерий Фурье; Bi – критерий Био; Rb – критерий Ребиндера; Bo – критерий Больцмана; ϵ – критерий фазового превращения вещества; Ko – критерий Коссовича; Pd – критерий Предводителява; Pn – критерий Поснова; Ψ – коэффициент неравномерности распределения температуры и влажности в теле; Γ – постоянная формы.

При изменении условий взаимодействия поверхности материала с внешней средой происходит изменение влияния критериев подобия на процесс сушки. В зависимости от роли и влияния на процесс сушки критерии подобия подразделяются на критерии поверхностного тепловлагообмена и критерии внутреннего тепломассопереноса [2]. Поскольку коэффициенты теплопереноса для тканей хорошо изучены [3], исследование сушки тканей тепловыми лучами ограничиваем изучением влияния критериев подобия на теплоперенос, а закономерности влагообмена рассмотрим на основе обработки экспериментальных данных. Зависимость коэффициентов теплопереноса для тканей приведены в таблице 1.

В процессе сушки тонких материалов

Таблица 1 – Зависимость коэффициентов переноса тепла от влажности тканей

Вискоза $\lambda_0 = 0,058 \text{ Вт / м } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$; $c_0 = 1600 \text{ Дж / кг } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$;					Лен $\lambda_0 = 0,058 \text{ Вт / м } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$; $c_0 = 1600 \text{ Дж / кг } \cdot \text{ }^\circ\text{C}$;				
W, %	λ_0 , Вт / м · °C	ρ , кг / м³	c , Дж / кг · °C	a , м² / ч	W, %	λ_0 , Вт / м · °C	ρ , кг / м³	c , Дж / кг · °C	a , м² / 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	0,19	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	4,41
					20	0,075	321	1946	4,32
					10	0,06	294	1744	4,27

при значениях теплообменного критерия Био $Bi < 0,2$ и критерия Фурье $Fo > 0,2$ происходит быстрое прогревание материала за счет глубокого проникновения излучения в ткань и выравнивания температур и влагосодержаний по поверхности и объему [1, 4]. В этих условиях сушка тканей происходит без температурных градиентов внутри тела и отсутствия в материале термического переноса вещества [2].

В отсутствии термического переноса вещества и фазовых превращений в тонких материалах влияние комплексного критерия $\varepsilon \cdot Ko \cdot Pn = 0$ [2]. Критерий Ребиндера Rb и критерий Био Bi оказывают влияние на теплоперенос. При малых значениях этих критериев влияние на скорость изменения температуры dT / dFo незначительно. В процессе сушки с уменьшением влагосодержания критерий Rb увеличивается, а критерий Ko уменьшается. Значения критерия Rb к концу сушки $Rb \approx 0,1 \div 0,35$ указывают на необходимость прекращения процесса для избежания перерасхода энергии на сушку и пересушивания материала. Критерий Коссовича Ko на начальной стадии сушки большее влияние оказывает на массоперенос, в заключительной – на теплоперенос [2]. Скорость прогрева материала определяется комбинированным отношением критериев $Bi / Ko = f(Fo)$ [2]. Критерий фазового превращения ε и критерий Поснова Pn в отсутствии термического переноса вещества $\varepsilon \cdot Pn = 0$ (влага в материале перемещается в виде жидкости). Постоянная формы тела для плоских тел $\Gamma = 0$. Коэффициенты неравномерности распределения температуры Ψ_t и влагосодержания Ψ_u во влажном теле при значениях критерия $Bi < 0,2$ для тканей равны $\Psi_t = \Psi_u = 1$. Происходит быстрое выравнивание температур и влагосодержаний в теле по поверхности и объему. Произведение критериев Fo и Предводителя Pd представляют важные обобщенные переменные по температурам и влагосодержаниям

$$Fo \cdot Pd_t = \frac{a\tau m_t R_v^2}{R_v^2 a} = m_t \tau; Fo \cdot Pd_u = m_u \tau, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; τ – время сушки, мин; R_v – отношение объема тела к поверхности, м; m_t и m_u – темп

нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания, мин⁻¹.

Радиационный критерий Больцмана Bo получен из решения уравнения энергии для сложного теплообмена в плоском слое поглощающей и излучающей среды с непрозрачными серыми границами [5]. В результате решения получен безразмерный комплекс

$$Bo = \frac{\lambda_*}{\varepsilon_* \sigma_0 T_*^3 \delta_*}, \quad (2)$$

где λ_* – теплопроводность излучающей непрозрачной среды; ε_* – степень черноты излучающего газа; σ_0 – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/м² К⁴; T_* – абсолютная температура излучающей среды по толщине излучающего слоя δ_* .

А.Н. Пехович [6] использовал критерий Bo для расчета температуры твердых тел при нагреве и охлаждении по номограммам. Для случая радиационного теплообмена в прозрачной непоглощающей среде критерий Больцмана имеет вид:

$$Bo = \frac{\lambda_m}{\varepsilon_{np} \sigma_0 T_{изл}^3 \delta}, \quad (3)$$

где λ_m – теплопроводность тела; ε_{np} – приведенная степень черноты системы излучатель-материал; $T_{изл}$ – абсолютная температура излучателя, К; δ – толщина материала, мм.

При построении расчетных графиков необходимы дополнительные условия: начальная температура материала $T_{ом}$; температура излучателя $T_{изл}$; отношение $T_{ом} / T_{изл}$, приведенная степень черноты системы излучатель-материал ε_{np} и безразмерная координата x / δ .

Безразмерная избыточная температура T^* задается условием

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{ам}}, \quad (4)$$

где t_c , \bar{t} , $t_{ам}$ – температура среды (воздуха), среднеинтегральная, и начальная температура влажного материала, °С.

За определяющую температуру при сушке тканей принималась температура теплоносителя (среды) t_c . Степень черноты системы излуча-

тель-материал определялась по зависимости

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1}, \quad (5)$$

где ε_1 и ε_m – степени черноты нихромового излучателя и материала.

Критерий Bo_0 абсолютно сухих тканей при заданных значениях ε_{np} зависит только от режима сушки $T_{усл}$, поскольку коэффициент теплопроводности сухих тканей λ_0 от температуры не зависит [3]. Численные значения Bo_w для влажных тканей значительно зависят от влажности. Влияние влажности тканей на теплопроводность и теплоемкость значительно и выражается зависимостями [3]

$$\lambda_w = \lambda_0 + 0,00145W, \text{ Вт/м}^\circ\text{С};$$

$$c_w = \frac{c_0 + c_w \bar{u}}{1 + \bar{u}}, \text{ Дж/кг}^\circ\text{С},$$

где λ_0 и λ_w – теплопроводности сухого и влажного материала, Вт/м^{°С}; c_0 и c_w – теплоемкости сухого тела и воды, Дж/кг^{°С}; W и \bar{u} – абсолютное и относительное текущее влагосодержание материала.

Плотность влажной ткани ρ_w измерялась в эксперименте весовым способом. Коэффициент температуропроводности a влажной ткани вычислялся по соотношению

$$a = \frac{\lambda_w}{c_w \rho_w}, \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Значения коэффициентов теплопереноса для тканей даны в таблице 1.

Безразмерная координата $X = x / \delta$ при $x = \delta$ для тонких материалов $X = 1$. В качестве определяющего размера принимается отношение объема тела к поверхности $R_v = V / F = \delta$. Упрощенное критериальное уравнение для безразмерной температуры можно представить в виде

$$T^* = f(Fo, Pd_t, Rb, Bi / Ko, Bo),$$

где $Fo \cdot Pd_t = m_t \tau$.

РЕГУЛЯРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ

В процессах нагревания или охлаждения твердых тел широко используется теория регу-

лярного режима Г.М. Кондратьева, согласно которой процесс нагревания определяется только условиями внешнего теплообмена, теплофизическими свойствами и размерами тела, а температура материала изменяется во времени по экспоненциальному закону [4]. Нагрев влажного тела в процессе сушки при $t_c = const$ представляет регулярный режим, как по температурам, так и по влагосодержаниям [4], поскольку и кривые сушки и температурные кривые представляют собой экспоненты.

Основным признаком регулярного режима в процессе сушки являются условия

$$-\frac{dt}{d\tau} = m_t (t_c - \bar{t}); \quad (6)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = m_u (u_0 - \bar{u}), \quad (7)$$

где u_0 – начальное влагосодержание материала.

Постоянные m_t и m_u определяются экспериментально, построением графических зависимостей $\ln(t_c - \bar{t})$ и $\ln(W_0 - \bar{W})$ от времени сушки τ .

Темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания m_u находятся из соотношений

$$tg \gamma_1 = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_1) - \ln(t_c - \bar{t}_2)}{\tau_2 - \tau_1} = m_t; \quad (8)$$

$$tg \gamma_2 = \frac{\ln(W_0 - W_2) - \ln(W_0 - W_1)}{\tau_2 - \tau_1} = m_u, \quad (9)$$

где t_c – температура среды (воздуха), ^{°С}; \bar{t}_1 и \bar{t}_2 – фиксированные значения температуры, ^{°С}; W_0 – начальное влагосодержание материала; W_1 и W_2 – фиксированные значения влагосодержания.

Из уравнения теплового баланса для стадии регулярного режима [4] можно записать выражение для темпа нагревания влажного тела

$$m_t = \frac{\bar{a} a}{\lambda_t R_v} \Psi_t = \frac{a}{R_v^2} Kn, \quad (10)$$

$$Kn = Bi \cdot \Psi_t = \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{\tau}} R_V \Psi_t; \Psi_t = \frac{t_c - t_n}{t_c - \bar{t}}$$

где $\bar{\alpha}$ – текущее значение коэффициента теплообмена, Вт/м²°С; Ψ_t – коэффициент неравномерности распределения температуры в теле; **Kn** – критерий Кондратьева; t_n – температура поверхности, °С.

При сушке тканей $R_V = 0,8 - 1,2$ мм и при значениях критерия $Bi < 0,2$ коэффициент формы $K_{\phi} \rightarrow 0$, а коэффициент неравномерности распределения температуры в теле $\Psi_t = 1$.

В этом случае $Kn = Bi$, а темп нагревания влажного тела равен [4, 7]

$$m_t = \frac{a}{R_V^2} Bi = \frac{\bar{\alpha}}{c_w \rho_o R_V}. \quad (11)$$

Для случая нагревания влажного тела при $Bi \rightarrow 0$ и отсутствия градиента температуры внутри тела можно записать балансовое уравнение тепла [4, 7]:

$$c_w \rho_o \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}) \frac{F}{V}, \quad (12)$$

где F – площадь поверхности влажного тела, м²; V – объем влажного тела, м³.

Тепло $\bar{\alpha} (t_c - \bar{t})$ идет на нагревание влажного тела. Решение (12) можно записать следующим образом [7]:

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{an}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_w \rho_o R_V} \tau\right). \quad (13)$$

Из уравнений (11) и (13) следует

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{an}} = \exp(-m_t \tau). \quad (14)$$

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено значение темпа нагревания для влажных тканей $m_t = 0,24$. Вычисление m_t по зависимости (11) дает значение $m_t \approx 0,3 - 0,4$.

Для безразмерного влагосодержания можно написать аналогичное соотношение:

$$\bar{U}^* = \frac{W_o - W}{W_o - W_p} = \exp(-m_u \tau), \quad (15)$$

где W_o, W_p, W – начальное, равновесное и текущее влагосодержание материала.

Секундный поток тепла на нагрев влажного тела [7]

$$q = c_w \rho_o R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau}. \quad (16)$$

Дифференцируя решение (13) и подставляя результат в (16), получаем [7]:

$$\frac{q}{\bar{\alpha} (t_c - t_{an})} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_w \rho_o R_V} \tau\right), \quad (17)$$

где t_c, t_{om} – температура среды (воздуха) и начальная температура влажного материала, °С.

Максимальное количество тепла, затраченное на испарение влаги из материала в начальной стадии процесса сушки, равно:

$$q_{max} = \bar{\alpha}_{кр} (t_c - t_{om}) = r \rho_o R_V (d\bar{u}/d\tau)_{max}. \quad (18)$$

где $(d\bar{u}/d\tau)_{max} = N_{max}$ – максимальная скорость сушки, определяемая по кривым сушки; r – теплота парообразования, Дж/кг.

Тогда уравнение (17) с учетом (18) можно записать в виде

$$q = q_{max} \exp(-m_t \tau). \quad (19)$$

Следовательно, регуляризация кинетики сушки происходит не только по температурам и влагосодержаниям, но и по тепловым потокам.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ВЫВОД ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

На рисунке 1 представлены кривые сушки и температурные кривые в процессе сушки вискозной ткани при различных режимах. Видно, что периода постоянной скорости сушки не наблюдается ни по температурам, ни по влагосодержаниям.

На рисунке 2 изображены графические зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$ для процесса сушки вискозы. Видно, что зависимости имеют вид прямых и, следовательно, изменение температуры и влагосодержания происходит по экспоненциальной зависимости. Темп нагревания влажного тела m_t является одинаковым для всех точек тела и не зависит от режима сушки. В стадии регулярного режима при $Bi < 0,2$ и $\Psi_t = 1$ температура принимает равномерное распределение по всему объёму тела и поверхности. Величина m_t не зависит от размеров, физических свойств тела, режима сушки и в стадии регулярного режима является величиной постоянной для среднеинтегральных значений температур и определяется только формой и видом тела [4, 7].

Темп убыли влагосодержания m_u является сложной функцией режима сушки, начального влагосодержания материала W_0 , способа подвода тепла и других факторов, влияющих на сушку. Обработка опытных данных показала, что отношение максимальной скорости сушки тканей к начальному влагосодержанию W_0 является обобщенной переменной, учитывающей влияние всех факторов, воздействующих на процесс.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты обработки экспериментальных данных в виде зависимостей $U^* = f(m_u \tau)$; $m_u = f(N_{max})$, $T^* = f(m_t \tau)$ и $T^* = f(Bo_w)$.

В результате обработки данных методом наименьших квадратов получены уравнения

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{ан}} = \exp(-1,15 m_t \tau); \quad (20)$$

$$U^* = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_p} = 0,17 \exp(m_u \tau); \quad (21)$$

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

где $N_{max} = (d\bar{u} / d\tau)$ – максимальная скорость сушки материала, мин⁻¹.

Использование устойчивых обобщенных комплексных переменных $m_t \tau$ и $m_u \tau$ позволяет определять температуру материала и время сушки при любых режимах и различных начальных влагосодержаниях. Такой метод исследования

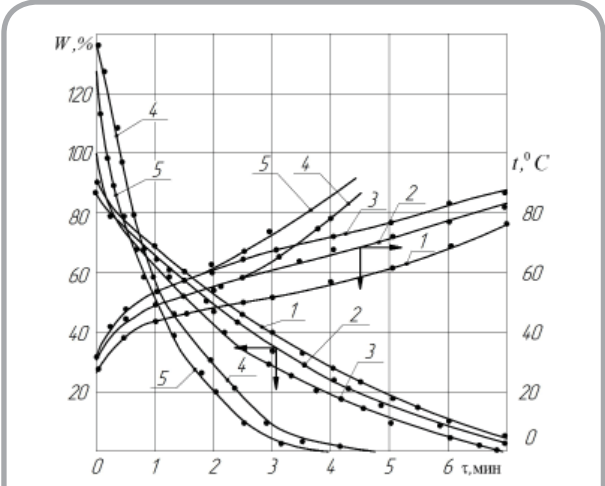


Рисунок 1 – Кривые сушки и температурные кривые в процессе сушки вискозной ткани при режимах: Вискоза. 1. $t_{узн} = 150$ °C; $t_c = 80$ °C; 2. $t_{узн} = 190$ °C; $t_c = 100$ °C; 3. $t_{узн} = 250$ °C; $t_c = 120$ °C; Лен: 4. $t_{узн} = 190$ °C; $t_c = 100$ °C; 5. $t_{узн} = 250$ °C; $t_c = 120$ °C; Скорость воздуха: $v = 0,8 \div 1,1$ м/с.

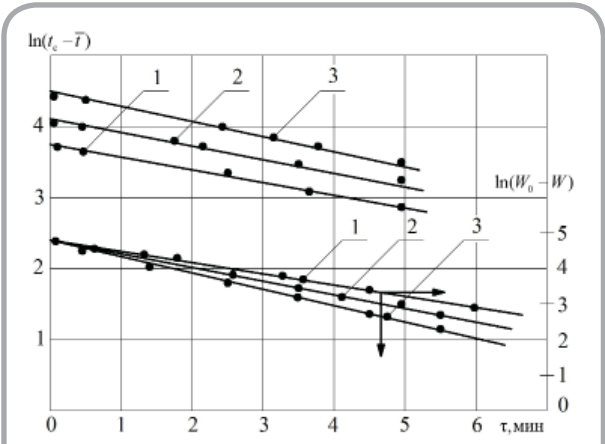


Рисунок 2 – Зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$ в процессе сушки вискозной ткани

значительно экономит время и сокращает объем расчетной работы. Решение уравнений (20) и (21) дает

$$\bar{t} = t_c - \frac{t_c - t_{ан}}{\exp(1,15 m_t \tau)} \quad (22)$$

$$\tau = \frac{1}{m_u} \ln \frac{W_0 - W}{0,17 (W_0 - W_p)} \quad (23)$$

Для исследования влияния на кинетику сушки тканей критериев подобия необходимо знать закономерности их изменения. Вычисление коэффициента теплообмена проводилось по критериальному уравнению [1]

$$Nu = 0,87 Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_m}\right)^2 \left(\frac{T_{изл}}{T_c}\right)^{0,45} \left(\frac{W_0}{W}\right)^{0,45} \quad (24)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; T_m , $T_{изл}$ и T_c – абсолютные температуры мокрого термометра, излучателя, среды (воздуха).

За определяющий размер при сушке тканей принималась длина образца по набеганию потока воздуха $l = 0,12$ м.

Плотность теплового потока определялась по уравнению теплообмена

$$q = \bar{\alpha} (t_c - t_n).$$

Критерий Ребиндера Rb и критерий Коссовича Ko вычислялись по соотношениям

$$Rb = \frac{c_w b}{r}; \quad Ko = \frac{r \Delta \bar{u}}{c_w \Delta t} = \frac{r (\bar{u}_0 - u_p)}{c_w (t_c - t_{ан})}$$

Температурный коэффициент сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ – важная характеристика кинетики сушки, определяется графическим дифференцированием температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ (рисунок 5 а). Обработкой эксперимента, представленного на рисунок 5 б, получена зависимость

$$Rb = 0,1 \exp(-1,4 (\bar{u} - u_p)). \quad (25)$$

В процессе сушки влажных материалов критерий Rb изменяется от нуля до некоторой максимальной величины, указывающей на прекращение процесса, а критерий Ko – от максимальной величины в начальной стадии сушки до нуля при $W = W_p$.

Результаты исследования влияния критериев подобия теплообмена на закономерности изменения относительной температуры T^* для всех режимов даны в таблице 2, а на рисунке 6

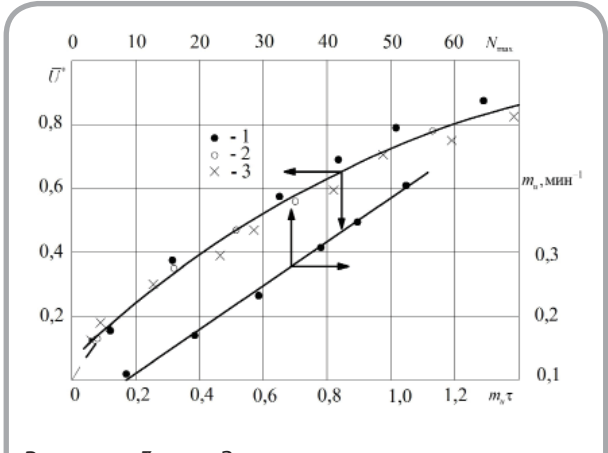


Рисунок 3 – Зависимость относительного влагосодержания \bar{U}^* от относительного времени сушки $m_t \tau$ и зависимость темпа убыли влагосодержания $m_u = f(N_{max})$ для процесса сушки вязкой ткани при режимах, указанных на рисунке 1

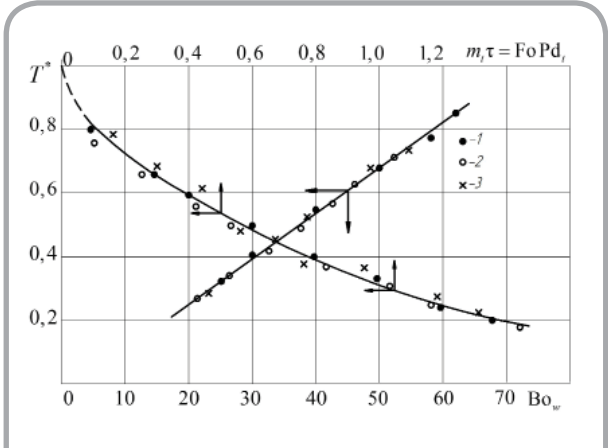


Рисунок 4 – Зависимости относительной избыточной температуры $T^* = f(m_t \tau)$ и $T^* = f(Bo_w)$ для процесса сушки вязкой ткани. Режимы сушки даны на рисунке 1

представлены зависимости для процесса сушки вязкой ткани

$$Bi / Ko = f(Fo \cdot Pd_i) = f(m_t \tau) \text{ и } T^* = f(Fo \cdot Pd_i) = f(m_t \tau).$$

Зависимость относительной избыточной температуры $T^* = f(Bi / Ko)$ имеет вид

$$T^* = 0,06 (Bi / Ko)^{0,5}. \quad (26)$$

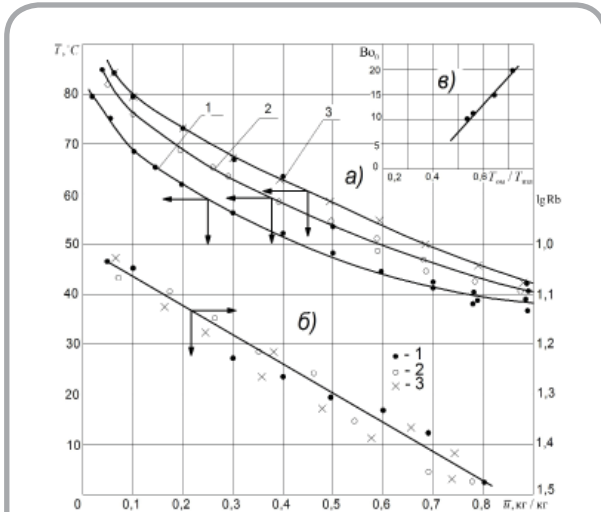


Рисунок 5 – Зависимости среднеинтегральной температуры \bar{T} и критерия Рейбиндера Rb от влагосодержания \bar{u} (а, б) и критерия Больцмана для сухого тела $Bo_0 = f(T_{om}/T_{uzl})$ (в) в процессе сушки тканей. Режимы указаны на рисунке 1

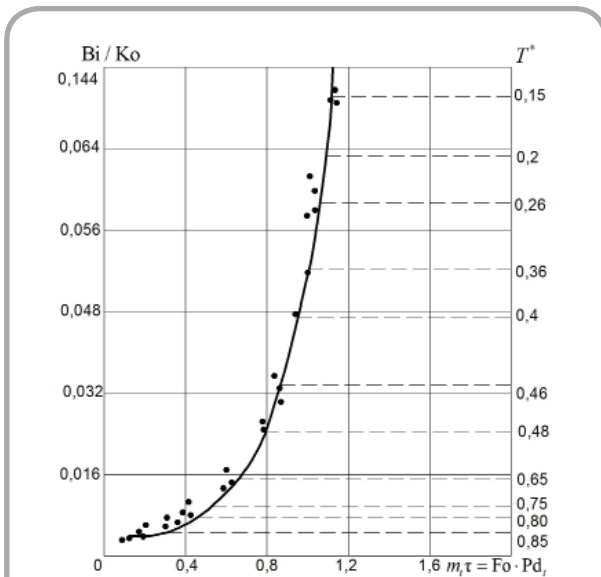


Рисунок 6 – Зависимости отношения критериев Bi/Ko и относительной температуры T^* от комбинированного критерия $Fo \cdot Pd_t = m_t \tau$ в процессе сушки технических тканей для заданных режимов сушки

Рассмотрим влияние критерия Больцмана на теплоперенос в процессе терморadiационной сушки тканей. При терморadiационной сушке влажных материалов значительно интенсифицируется теплообмен и увеличивается

интенсивность испарения влаги с поверхности влажного тела. В этих условиях критерий Больцмана в одинаковой мере влияет на тепло- и влагообмен.

Численные величины критерия Bo_0 для сухих тканей при заданных режимах сушки в зависимости от режима при $\lambda_0 = const$ принимали следующие значения для вязкой и ткани:

1. $T_{uzl} = 423$ К; $t_c = 80$ °С; $T_{om}/T_{uzl} = 0,71$; $Bo_0 = 18$.
2. $T_{uzl} = 463$ К; $t_c = 100$ °С; $T_{om}/T_{uzl} = 0,65$; $Bo_0 = 15$.
3. $T_{uzl} = 523$ К; $t_c = 120$ °С; $T_{om}/T_{uzl} = 0,57$; $Bo_0 = 11$.

На рисунке 4 представлена зависимость $T^* = f(Bo_w)$ для процесса сушки вязкой ткани, описываемая уравнением

$$T^* = 0,0135 (Bo_w + 0,55 W), \quad (27)$$

$$Bo_w = Bo_0 + 0,55 W. \quad (28)$$

Критерий Больцмана Bo для сухого материала является функцией T_{uzl} и отношения T_{om}/T_{uzl} и определяется зависимостью

$$Bo_0 = 49,5 \frac{T_{om}}{T_{uzl}} - 17. \quad (29)$$

Взаимосвязь между критериями Больцмана для влажной и сухой тканей при сушке тепловыми лучами для заданных режимов можно выразить уравнениями

$$\frac{Bo_w}{Bo_0} = \frac{T_{uzl}}{T_{om}} \exp(0,012 W); \quad (30)$$

$$Bo_w = \frac{T_{uzl}}{T_{om}} Bo_0 \exp(0,012 W). \quad (31)$$

где W – заданное текущее влагосодержание материала.

Плотность тепловых потоков в процессе сушки тканей достаточно точно вычисляется по уравнениям (18) и (19). На рисунке 7 б даны за-

Таблица 2 – Расчетные значения критериев Нуссельта Nu , Био Bi , Коссовича Ko для процесса сушки вискозной ткани при различных режимах

Режим сушки: $T_{изл} = 423 \text{ K}$; $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
$W, \%$	Nu	$\bar{\alpha}, \text{Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$	Bi	Ko	Bi / Ko	T^*	$\bar{t}_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{рас}, \text{ }^\circ\text{C}$
80	87,7	26,3	0,13	31,7	0,004	0,84	40	38
60	78	23,4	0,138	20	0,007	0,76	44	42
40	63,1	18,9	0,135	12,7	0,011	0,65	50	48
20	46,2	13,9	0,132	5,4	0,024	0,46	61	58
10	32,2	10,2	0,125	2,5	0,049	0,35	67	64
Режим сушки: $T_{изл} = 463 \text{ K}$; $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
80	94,9	30,5	0,145	29	0,005	0,84	45	42
60	83,6	26,8	0,151	17	0,0088	0,75	50	48
40	68,3	21,8	0,155	9,85	0,0157	0,65	56	55
20	50,1	16,2	0,157	4,7	0,033	0,48	68	69
10	26,5	11,7	0,145	2,2	0,066	0,38	73	73
Режим сушки: $T_{изл} = 523 \text{ K}$; $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
80	104	34,4	0,168	29	0,0058	0,86	46	43
60	91,8	30,3	0,17	16	0,01	0,76	53	52
40	75	24,7	0,175	9,4	0,018	0,69	63	64
20	54,9	18,1	0,178	4,3	0,0410,	0,50	74	75
10	40,3	13,5	0,165	2,2	075	0,45	80	79

висимости $q = f(W)$, которые выражаются уравнением

$$q = D \exp(0,015W); D = 10^3 \left(3,4 - 3,8 \frac{T_{изл}}{T_{изл}} \right). \quad (32)$$

Для подтверждения достоверности полученных значений тепловых потоков по уравнениям (19) и (32) проведен расчет теплообмена по формуле излучения Стефана-Больцмана с учетом влияния конвекции [3]:

$$q_{изл} = (\varepsilon_{нр} + \varepsilon_{к}) C_0 \left[\left(\frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \varphi \left(\frac{W_0}{W} \right)^{0,42}, \quad (33)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт/м}^2 \text{ K}^4$.

Угловой коэффициент эффективности излучения $\varphi = 1$.

Приведенная степень черноты системы определялась по выражению (5).

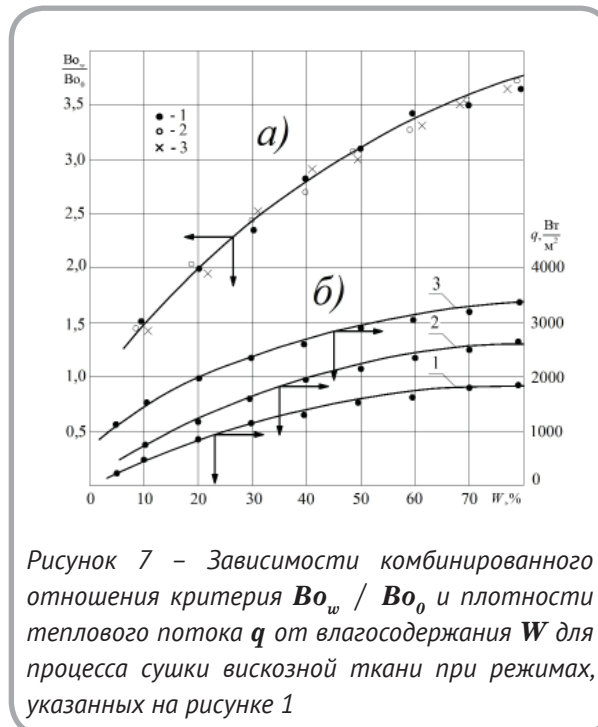


Рисунок 7 – Зависимости комбинированного отношения критерия Bo_w / Bo_0 и плотности теплового потока q от влагосодержания W для процесса сушки вискозной ткани при режимах, указанных на рисунке 1

Участие конвекции учитывается увеличением степени черноты системы за счет $\varepsilon_{к}$:

$$\varepsilon_{\kappa} = \frac{\bar{\alpha}_{\kappa}(t_c - \bar{t}_n)}{C_o \left[\left(\frac{T_{\text{усл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right]}$$

При использовании уравнения (33) суммарное значение $(\varepsilon_{np} + \varepsilon_{\kappa})$ составляло 0,66 – 0,7 для всего процесса сушки тканей. Результаты расчетов $q_{\text{усл}}$ по формуле (33) даны в таблице 3.

ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ ТКАНЕЙ

По результатам экспериментов (рисунке 1) вычисляются значения относительной избыточной температуры T^* как функция влагосодержания W тканей. Затем, с использованием таблицы 1, вычисляются значения критериев Больцмана для абсолютно сухой и влажной тканей. По эмпирическим формулам (27, 28) наносятся линии $Bo_o = const$ с фиксацией значений влагосодержаний для каждого режима сушки и строятся линии $W = const$ с обозначением времени сушки $\tau = f(W)$. В нижней части графика (рисунок 8) наносятся зависимости плотности тепловых потоков $q = f(Bo_w, W)$. Таким образом, все основные характеристики сушки тканей тепловыми лучами рассчитываются графическим способом, что позволяет достаточно просто, точно и быстро проводить все необходимые расчеты, что

экономит время и сокращает объем расчетной работы. График (рисунок 8) является расчетной номограммой.

Для расчетов по графику достаточно знать режим сушки, который задается значением Bo_o и текущим влагосодержанием W . В таблице 4 дано сопоставление экспериментальных и графических значений основных параметров кинетики сушки вискозной ткани по графику рисунка 8.

Пример расчета: Режим сушки вискозы $T_{\text{усл}} = 423 \text{ K}$, $T_{\text{ом}} / T_{\text{усл}} = 0,71$. Для данного режима $Bo_o = 18$. По заданному текущему влагосодержанию $W = 60 \%$, относительная температура $T^* = 0,66$; интегральная температура $\bar{t}_{\text{граф}} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{t}_{\text{экс}} = 43 \text{ }^\circ\text{C}$; время сушки: $\tau_{\text{граф}} = 1,5$ мин; $\tau_{\text{экс}} = 1,5$ мин; $Bo_w_{\text{граф}} = 49,5$; $Bo_w_{\text{расч}} = 51$; $Bo_w_{\text{расч}} = 50,5$ по формулам (28) и (31).

Для вискозной ткани расчетный график строится в том же порядке, с использованием тех же эмпирических уравнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования терморadiационной сушки тканей рассмотрено влияние отдельных критериев подобия теплообмена на кинетику сушки технических тканей. Изучение кинетики

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений среднеинтегральных температур, времени сушки и плотностей тепловых потоков по формулам (22), (23) и (19), (32), (33) для различных режимов сушки вискозной ткани

Режим сушки: $T_{\text{усл}} = 423 \text{ K}$; $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
$W, \%$	$\tau_{\text{экс}}, \text{ мин}$	$\tau_{\text{рас}}, \text{ мин}$ (23)	$\bar{t}_{\text{экс}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{рас}}, \text{ }^\circ\text{C}$ (22)	$q, \text{ Вт/м}^2$ (19)	$q, \text{ Вт/м}^2$ (32)	$q_{\text{экс}}, \text{ Вт/м}^2$	$q_{\text{усл}}, \text{ Вт/м}^2$ (33)
80	0,65	0,72	42	40	2750	3060	2650	2880
60	1,95	1,76	54	54	2314	2280	2270	1890
40	2,85	3,2	61,5	62	1965	1795	2000	1750
20	4,5	4,3	71,5	72	1380	1270	1280	1100
10	5,4	4,9	78	78	1980	1020	850	780
Режим сушки: $T_{\text{усл}} = 523 \text{ K}$; $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 1,1 \text{ м/с}$								
80	0,4	0,47	42	39	3510	3900	3420	3300
60	1,25	1,45	55	54,5	3140	3150	3125	2780
40	2,32	2,54	68	68	2585	2350	2620	2100
20	3,7	3,35	77	79	2140	1780	2000	1690
10	5,7	5,2	83	85	1427	1495	1500	1250

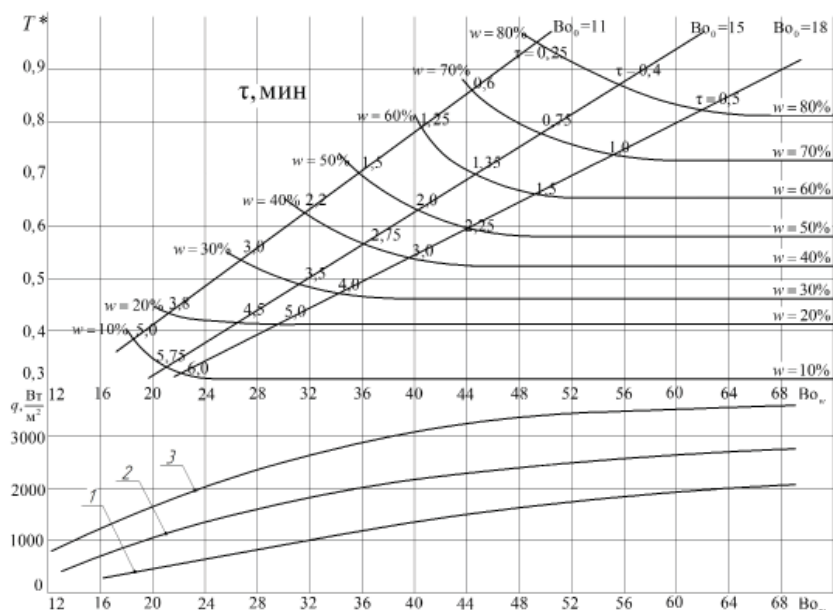


Рисунок 8 – График для расчета основных параметров кинетики сушки вязкой ткани для заданных режимов

сушки тканей методом регулярного теплового режима нагревания влажных тел и обработка опытных данных на основе обобщенных переменных позволяет получить расчетные эмпирические уравнения для определения основных кинетических характеристик процесса. Определены темп нагревания влажного тела m_t и темп убыли влагосодержания m_w . На основе взаимо-

связи между критерием Больцмана для сухого и влажного тела предложен графический способ расчета кинетики сушки тканей, что экономит время и средства на проведение эксперимента и сокращает объем расчетной работы. Предлагаемый метод исследования может быть использован в расчетах кинетики сушки различных влажных материалов термоизлучением.

Таблица 4 – Сопоставление экспериментальных и графических значений основных параметров кинетики сушки вязкой ткани по графику рисунка 8

Режим сушки: $T_{изл} = 423 \text{ K}; t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1,1 \text{ м/с}$								
$W, \%$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{рас}, \text{ }^\circ\text{C}$ (23)	$T^*_{экс}$	$T^*_{граф}$	$\bar{t}_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{граф}, \text{ }^\circ\text{C}$	$q_{экс}, \text{ Вт/м}^2$	$q_{граф}, \text{ Вт/м}^2$ (32)
70	62	64	0,76	0,75	43	40	1850	1850
60	90	89	0,67	0,66	46	44	1700	1600
40	180	180	0,54	0,53	51	49,5	1250	1270
20	285	300	0,39	0,42	60,5	59	850	750
10	365	360	0,38	0,33	67	64	500	600
Режим сушки: $T_{изл} = 463 \text{ K}; t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}; v = 1,1 \text{ м/с}$								
70	46	150	0,77	0,77	46	44	2500	2600
60	85	90	0,71	0,71	51	49	2450	2400
40	158	168	0,57	0,58	60	58	2000	2150
20	278	270	0,42	0,42	70	71	980	1150
10	295	305	0,33	0,33	78	76	750	950

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А.В. (1968), *Теория сушки*, Москва, 472 с.
2. Лыков, А.В., Михайлов, Ю.А. (1963), *Теория тепло- и массопереноса*, Москва, 536 с.
3. Колесников, П.А. (1965), *Теплозащитные свойства одежды*, Москва, 340 с.
4. Лыков, А.В. (1967), *Теория теплопроводности*, Москва, 600 с.
5. Кутателадзе, С.С. (1979), *Основы теории теплообмена*, Москва, 416 с.
6. Пехович А.Н., Жидких В.М. (1968), *Расчеты теплового режима твердых тел*, Ленинград, 304 с.
7. Лыков, А.В. (1961), *Теоретические основы строительной теплофизики*, Минск, 520 с.
8. Ольшанский, А.И., Ольшанский, В.И. (2011), Исследование процесса сушки тонких материалов методом регулярного режима, *Весті НАН Беларусі*. Серия физико-технических наук, № 2, С. 75 – 81.
9. Ольшанский, А.И., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И. (2014), Графоаналитический метод расчета конвективно-терморadiационной сушки технических тканей, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, Вып. 26, С. 74–84.

REFERENCES

1. Lykov, A.V. (1968), *Teorija sushki* [Drying theory], Moscow, 472 p.
2. Lykov, A.V., Mikhajlov, Y.A. (1963), *Teorija teplo- i massoperenosa* [Theory of heat - and mass transfer], Moscow, 536 p.
3. Kolesnikov, P. A. (1965), *Teplozashhitnye svojstva odezhdy* [Heat-shielding properties of clothes], Moscow, 340 p.
4. Lykov, A.V. (1967), *Teorija teploprovodnosti* [Heat conductivity theory], Moscow, 600 p.
5. Kutateladze, S.S. (1979), *Osnovy teorii teploobmena*, [Fundamentals of the theory of heat transfer], Moscow, 416 p.
6. Pekhovich, A.N., Zhidkikh, V.M. (1968), *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the thermal regime of solids], Moscow, 304 p.
7. Lykov, A.V. (1961), *Teoreticheskie osnovy stroitel'noj teplofiziki* [Theoretical fundamentals of construction thermophysics], Minsk, 520 p.
8. 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.
9. Olshansky, A.I., Zhernosek, S.V., Olshansky, V. I. (2014), The graphic analytical method of calculation of convective-thermoradiation drying of technical fabrics [Grafoanaliticheskij metod rascheta konvektivno-termoradiacionnoj sushki tehnicheskikh tkanej], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Bulletin of Vitebsk State Technological University*, Issue 26, Vitebsk, 2014, pp. 74–84.

Статья поступила в редакцию 01.09.2014 г.