

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

MODELING OF THE CONVECTIVE DRYING KINETICS OF TEXTILE MATERIALS UNDER ULTRASONIC ACTION

М.К. КОШЕЛЕВА, О.Р. ДОРНЯК, В.Н. ХМЕЛЕВ, Т.А. НОВИКОВА

M.K. KOSHELEVA, O.R. DORNYAK, V.N. KHMELEV, T.A. NOVIKOVA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова)

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art),
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State
Technical University named after I.I. Polzunov)

E-mail: oxtpaxt@yandex.ru

Представлены результаты исследования процесса конвективной сушки тканей при наложении ультразвуковых колебаний. Рассмотрен способ вычисления локальных коэффициентов влагопроводности, которые зависят от влагосодержания, температуры, коэффициента проницаемости, сорбционных свойств материала. Представлены результаты расчета влагопереноса в процессе комбинированной сушки тканей с применением ультразвука с использованием специальной формулы для локального коэффициента влагопроводности. Локальные коэффициенты влагопроводности получены для хлопчатобумажных и плотных шерстяных тканей при конвективной сушке с ультразвуковой интенсификацией. Для плотных тканей рассмотрены два режима с наличием и без наличия воздушного слоя между поверхностью ультразвукового излучателя и поверхностью ткани. Локальный коэффициент влагопереноса определен с помощью вычислительного эксперимента для краевой задачи влагопроводности. Полученные значения кинетических коэффициентов согласуются с результатами, которые получены известным зональным методом для процессов сушки тканей с применением и без применения ультразвука. Найденные коэффициенты могут быть использованы для моделирования процессов влагопереноса при термической обработке тканей как конвективным способом, так и в комбинации с воздействием ультразвукового поля.

The results of the study of the process of textiles convective drying with the imposition of ultrasonic vibrations are presented. The method of calculating the local coefficients of moisture conductivity, which depends on the moisture content, temperature, permeability coefficient, sorption properties of the material, is considered. Besides, the results of the calculation of moisture transfer in the process of tissues' combined drying using ultrasound using a special formula for the local coefficient of moisture conductivity are presented. Local moisture conductivity coefficients were obtained for cotton and dense woolen fabrics during convective drying with ultrasonic intensification. For dense tissues, two modes are considered both with

and without the presence of an air layer between the surface of the ultrasonic emitter and the surface of the tissue. The local moisture transfer coefficient was determined using a computational experiment for the boundary value problem of moisture conductivity. The obtained values of kinetic coefficients are consistent with the results obtained by the well-known zonal method for tissue drying processes with and without ultrasound. The obtained coefficients can be used to simulate moisture transfer processes during thermal treatment of tissues both by convective method and in combination with the influence of an ultrasonic field.

Ключевые слова: процесс сушки, ультразвуковая интенсификация, плоские волокнистые материалы, кинетические коэффициенты.

Keywords: drying process, ultrasonic intensification, flat fibrous materials, kinetic coefficients.

Введение

Ультразвуковое (УЗ) воздействие позволяет интенсифицировать процесс сушки капиллярно-пористых материалов [1...3]. Наложение ультразвукового поля повышает эффективность конвективной сушки плотных тканей из натуральных волокон при сравнительно невысоких значениях температуры сушильного агента. Такой комбинированный способ термообработки сохраняет прочностные и эластичные свойства тканей, улучшает качество окраски тканого полотна, благодаря снижению скорости миграции красителей и различных аппретов.

Акустическое воздействие на материал при сушке приводит к интенсификации испарения на межфазных границах ненасыщенного капиллярно-пористого материала и ускорению течения влаги из внутренних слоев образца на поверхность [2]. Акустические колебания с частотами из звукового диапазона 5...10 кГц при интенсивности колебаний 145...150 дБ опасны для здоровья человека, поэтому в современных технологиях сушки практически не используются. Ультразвуковые колебания с частотами более 20 кГц не оказывают вредного воздействия на людей. Однако их использование в сушильных установках для тканых материалов пока не получило широкого распространения. Это связано с отсутствием высокоэффективных излучателей, способных создать ультразвуковые колебания с уровнем звукового давления до 145 дБ, которые равномерно распределены

по объему сушильной камеры, когда скорость сушильного агента достаточно велика и составляет 5...30 м/с.

В работе [3] представлены результаты экспериментальных исследований процесса конвективной сушки текстильных материалов с использованием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности при скорости потока сушильного агента 5 м/с. Для проведения исследований в Бийском технологическом институте был разработан специализированный стенд с излучателем ультразвуковых колебаний, позволяющим создавать в зоне сушки колебания с интенсивностью 150 дБ на частоте более 20 кГц и измерительным оборудованием, позволяющим контролировать изменение влагосодержания от времени при различных температурах, скоростях потока и режимах ультразвукового воздействия. В результате исследований доказана возможность 1,5-кратного ускорения ультразвуковой сушки текстильных материалов малой плотности ($M < 300 \text{ г/м}^2$). Эксперименты по сушке тканей более высокой плотности ($M > 300 \text{ г/м}^2$) в аналогичных условиях не показали достоверного эффекта от наложения ультразвуковых волн. Это объясняется тем, что более плотные ткани обладают большей звукопоглощающей способностью, что приводит к снижению доли энергии, идущей на процессы фазовых переходов и формированию гидродинамических течений.

Авторы [3] изменили первоначальные условия сушки плотных тканей. Слой ткани разместили практически на поверхности

излучателя ультразвуковых волн, так что непосредственному воздействию скоростного потока сушильного агента подвергалась только одна сторона образца.

Такой способ термообработки плотных тканей привел практически к трехкратному ускорению процесса обезвоживания по сравнению с процессом конвективной сушки.

Для выбора режимов и условий, обеспечивающих максимальную эффективность процесса сушки различных материалов, часто используется уравнение влагопроводности. В известных работах значение коэффициента влагопроводности определяют, применяя

- эмпирические соотношения [4];
- зональный метод на основе аналитических решений уравнения влагопроводности [5];
- методы решения обратных задач [6].

В данной работе представлены результаты расчета влагопереноса в процессе акусто-конвективной комбинированной сушки тканей с использованием специальной формулы для локального коэффициента влагопроводности.

Материалы и методы

Локальные кинетические коэффициенты влагопроводности определены для двух видов окрашенных тканей, которые являются типовыми для своих групп.

1. Хлопчатобумажная ткань с поверхностной плотностью $M=295 \text{ г/м}^2$.
2. Шерстяная тонкосуконная пальтовая ткань с поверхностной плотностью $M=400 \text{ г/м}^2$.

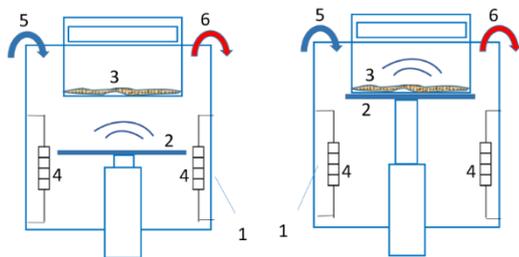


Рис. 1

Рис. 2

На рис. 1 и 2 представлены схемы двух типов размещения ультразвукового излучателя 2 в лабораторной сушильной камере 1

при сушке образца ткани 3. Здесь 4 – нагревательные элементы, 5 и 6 – входящие и выходящие потоки сушильного агента.

Условия термического и ультразвукового воздействия: температура сушильного агента 60°C ; относительная влажность воздуха 0,005; скорость потока воздуха 5 м/с; интенсивность ультразвуковых колебаний 150 дБ, частота колебаний 20 кГц.

Для плотных тканей рассматривались процессы влагопереноса двух типов:

1. Полное обтекание образца ткани потоком сушильного агента. Волны ультразвукового диапазона достигают поверхности образца ткани, отдав часть энергии парогазовой смеси из газового промежутка (рис. 1).

2. Одностороннее обтекание, когда одна поверхность тканевого образца размещается в непосредственной близости от поверхности излучателя (рис. 2). В этом случае мощность УЗ воздействия на элементы ткани существенно возрастает [3].

Экспериментальные данные получены в [3] на специализированном стенде, который позволяет фиксировать основные характеристики процесса сушки и осуществлять непрерывный контроль влагосодержания высушиваемого образца ткани во времени.

Математическая модель

Расчетная формула для коэффициента влагопроводности (для переноса в виде жидкости) получена на основе сложной многофакторной модели тепловлагопереноса в капиллярно-пористом теле как многофазной системе [7], [8]. Эта формула может быть использована для капиллярно-пористых материалов различной природы. Она имеет вид [9]:

$$a_m = \frac{K_{23} \Psi_{23}(\theta_2) RT}{\mu_2(T)} \frac{u}{\bar{v}} \frac{\partial \varphi}{\partial u}; \quad \varphi = \varphi(u, T). \quad (1)$$

Здесь $a_m = a_m(u, T)$ – коэффициент влагопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; u – влагосодержание материала, $\text{кг}/\text{кг}$; φ – относительная влажность воздуха; T – температура, К ; $\Psi_{23}(\theta)$ – относительная фазовая проницаемость жидкости; θ_2 – насыщенность объема порового пространства жидкой фазой; μ_2 –

вязкость жидкости, Па·с; R – универсальная газовая постоянная Дж/(моль·К); \bar{v} – молярный объем жидкости, м³/моль; K_{23} – коэффициент проницаемости жидкой фазы при полном насыщении, м². Нижние индексы относятся к отдельным фазам гетерогенной системы: индекс 1 – к парогазовой, 2 – к жидкой, 3 – к твердой фазе.

Из уравнения (1) видно, что коэффициент влагопроводности нелинейным образом зависит от влагосодержания, а также от температуры в данной частице материала. Для расчетов кинетического коэффициента $a_m = a_m(u, T)$ необходимо определить

– уравнение изотермы сорбции (десорбции) паров воды $\varphi = \varphi(u, T)$;

– значение коэффициента проницаемости пористой системы жидкостью K_{23} и функцию относительной фазовой проницаемости $\Psi(\theta)$.

Для определения сорбционных свойств тканей используются результаты опытов на термостатируемой вакуумной сорбционной установке с пружинными весами Мак-Бена – Бахра [10]. Уравнение изотермы сорбции принято в виде [11]:

$$u = u_{mg} \varphi^{a_0 k^\varphi}, \quad (2)$$

где u – равновесное влагосодержание; u_{mg} – максимальное гигроскопическое влагосодержание при данной температуре; φ – относительная влажность воздуха; a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые соответственно структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи.

Т а б л и ц а 1

Вид ткани	Коэффициенты уравнения десорбции		
	u_{mg}	a_0	k
Хлопчатобумажная ткань ($M=295$ г/м ²)	0,19	0,6739	3,649
Шерстяная ткань ($M=400$ г/м ²)	0,27	0,6877	3,626

На основе опытной изотермы десорбции с использованием метода наименьших квадратов определены постоянные уравне-

ния изотермы десорбции (2). В табл. 1 представлены константы уравнения изотермы десорбции для окрашенных тканей при температуре 22°C.

Экспериментальные (●) и расчетные (—) изотермы десорбции паров воды при $T=22^\circ\text{C}$ окрашенными хлопчатобумажной (1) и шерстяной (2) тканями показаны на рис. 3.

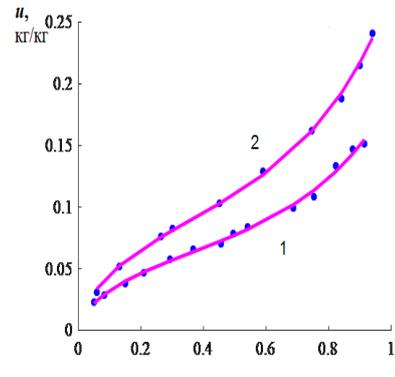


Рис. 3

Задача определения коэффициента проницаемости K_{23} сформулирована на основе прямой краевой задачи для нестационарного нелинейного уравнения влагопроводности. Функция относительной фазовой проницаемости принята равной единице: $\Psi_{23}(\theta)=1$. Зависимость максимального гигроскопического влагосодержания от температуры не учитывается ($u_{mg} \neq u_{mg}(T)$). Постановка задачи включает одномерное уравнение влагопроводности при отсутствии фазовых переходов [1]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} \right), t > 0, \quad (3)$$

начальное условие:

$$u = u_0, t = 0, \quad (4)$$

и граничные условия, которые определяются способом наложения ультразвуковых колебаний. Для случая комбинированной сушки образца ткани по схеме, представленной на рис. 1:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, x = 0, t > 0, \quad (5)$$

$$u = u_{eq}, x = \frac{L}{2}, t > 0. \quad (6)$$

Для случая комбинированной сушки образца ткани по схеме, представленной на рис. 2:

$$a_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} = \beta_m (u - u_{eq}), x = 0, t > 0, \quad (7)$$

$$u = u_{eq}, x = L, t > 0. \quad (8)$$

Здесь x – поперечная координата, м; t – время, с; L – толщина ткани, м; u_{eq} –

$$J(K_{23}) = \sum_i \left\{ \left[u_{av_i}(K_{23}) - u_{av_{exp_i}} \right] / u_{av_{exp_i}} \right\}^2 \rightarrow \min; u_{av} = \frac{1}{L} \int_0^L u \, dx. \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Найденные решения для коэффициента проницаемости K_{23} , которые позволяют определять расчетным путем локальные коэффициенты влагопроводности при собственно конвективной сушке, при конвективной сушке, совмещенной с ультразвуковым воздействием, и коэффициент массоотдачи для плотной шерстяной ткани, представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Вид ткани	Коэффициент проницаемости K_{23} , м ² / коэффициент массоотдачи β_m , кг/(с·м ²)		
	без УЗ обработки	схема УЗ обработки	
		рис. 1-а	рис. 1-б
Хлопчатобумажная ткань ($M=295$ г/м ²)	$4 \cdot 10^{-21}/-$	$5,6 \cdot 10^{-21}/-$	-
Шерстяная ткань ($M=400$ г/м ²)	$6,6 \cdot 10^{-21}/-$	$6,6 \cdot 10^{-21}/-$	$2 \cdot 10^{-20}/$ $1,3 \cdot 10^{-2}$

На рис. 4...8 представлены кривые кинетики сушки хлопчатобумажной и шерстяной тканей, полученные экспериментально и с помощью численной реализации задачи (1...6) или (1...4, 7...8). Численные расчеты удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. Порядок рассчитанных значений коэффициента влагопроводности совпадает со значениями, полученными зональным методом [5]. На рис. 4 приведены расчетные и опытные данные по

равновесное влагосодержание материала при данных значениях температуры и относительной влажности сушильного агента, кг/кг; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; β_m – коэффициент массоотдачи кг/(с·м²).

Используя опытные и расчетные зависимости среднего влагосодержания u_{av} от времени, можно получить значения коэффициента проницаемости K_{23} , входящего в формулу (1) как величины, минимизирующей функционал вида:

кинетики сушки для хлопчатобумажной ткани с УЗ и без УЗ воздействия. Кривая кинетики сушки для хлопчатобумажной ткани: (1) - расчетные данные без УЗ, (2) - экспериментальные данные без УЗ; (3) - расчетные данные с УЗ, (4) - экспериментальные данные с УЗ.

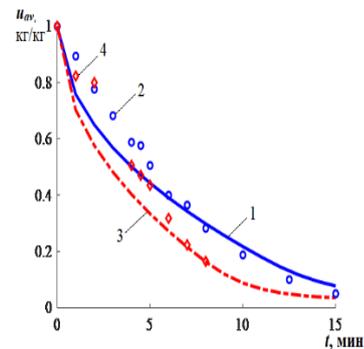


Рис. 4

На рис. 5 и 6 приведены кривые кинетики сушки для шерстяной ткани при схеме УЗ воздействия, соответствующего рис. 1 и рис.2.

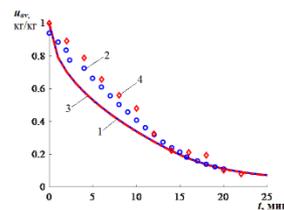


Рис. 5

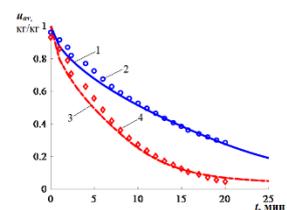


Рис. 6

Рис. 5 соответствует схеме УЗ воздействия, представленной на рис. 1. Рис. 6 соответствует схеме УЗ воздействия, представленной на рис. 2. Частота ультразвуковых колебаний составляет 20 кГц, интенсивность 150 дБ. Кинетика сушки: (1) - расчетные данные без УЗ, (2) - экспериментальные данные без УЗ; (3) - расчетные данные с УЗ, (4) - экспериментальные данные с УЗ.

На рис. 7 показано изменение локальных коэффициентов влагопроводности шерстяной ткани от времени.

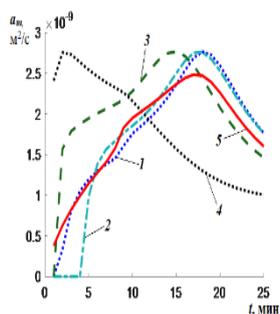


Рис. 7

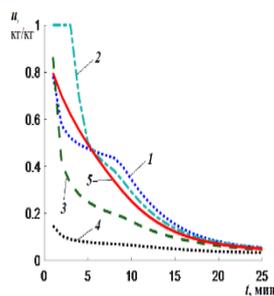


Рис. 8

На рис. 8 представлено изменение влагосодержания шерстяной ткани во времени для шерстяной ткани при схеме УЗ воздействия, соответствующего рис. 2. Отношение поперечной координаты x к толщине ткани L (x/L) равны: 1 – 0,06; 2 – 0,51; 3 – 0,75; 4 – 0,95; 5 – среднее изменение влагосодержания.

Рис. 7 иллюстрирует нелинейный характер изменения во времени коэффициента влагопроводности a_m в различных точках поперечного сечения образца ткани. Коэффициенты a_m возрастают в первом периоде сушки, когда скорость обезвоживания образца велика, как видно из рис. 8. Затем происходит уменьшение значений коэффициента влагопроводности и скорость сушки снижается, что видно из графиков, приведенных на рис. 7 и рис. 8. Продолжительность первого и второго периода сушки в разных точках сечения образца ткани различна. Следует отметить, что коэффициент проницаемости шерстяной ткани выше, чем хлопчатобумажной, но скорость процесса сушки и коэффициент влагопроводности

выше для хлопчатобумажной ткани. Это связано с достаточно существенным влиянием на кинетические коэффициенты свойств изотермы десорбции этих материалов в соответствии с уравнением (1).

Представляет интерес оценка влияния ультразвуковой обработки на длительность процесса сушки. Как видно из зависимостей рис. 3, в условиях конвективной сушки хлопчатобумажной ткани воздействие ультразвуком по схеме, представленной на рис. 1, приводит к сокращению длительности процесса сушки в 1,5 раза. Процесс сушки плотной шерстяной ткани в аналогичных условиях оказывается неэффективным, что видно из рис. 5. Увеличение интенсивности ультразвукового воздействия на ткань за счет приближения излучателя к поверхности ткани по схеме, которая представлена на рис. 2, позволяет интенсифицировать процесс сушки плотной шерстяной ткани, что демонстрирует рис. 6.

Следует отметить, что для проведения кинетических расчетов процесса конвективной сушки плоских текстильных материалов необходимо накопление данных по кинетическим коэффициентам, в том числе влагопроводности, для разных тканей, что позволит оценивать разное интенсифицирующее воздействие на процесс сушки и расширит использование математических методов расчета кинетики сушки [3], [5], [12...14].

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований получены локальные коэффициенты влагопроводности для двух видов тканей из хлопкового и шерстяного волокна при конвективной сушке в условиях ультразвукового воздействия. При этом для плотных тканей рассмотрены два режима с наличием и без наличия газового слоя между поверхностью излучателя и поверхностью ткани. Локальный коэффициент влагопереноса определен с помощью вычислительного эксперимента для краевой задачи влагопроводности. Показано, что формула (1) может быть использована для описания кинетики сушки тканей. Коэффициент

влагопроводности является функцией влагосодержания, температуры и проницаемости материала, а также зависит от его сорбционных свойств. Значения кинетических коэффициентов, определенных по предложенной методике, согласуются с результатами, полученными зональным методом для процессов сушки тканей с применением и без применения ультразвука. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологических режимов сушки текстильных материалов, в которых используется комбинация классического конвективного метода сушки и ультразвукового воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mujumdar, A.S. Handbook of Industrial Drying. Marcel Dekker: New-York, 1995.
2. Kudra T; Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. Marcel Dekker: New York, 2007.
3. Kosheleva M.K., Golykh R.N., Novikova T.A., Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov, A.V. Ultrasonic drying of textile materials // In Proceedings of 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol. – 2017. P. 283...289.
4. Luikov A.V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies ; Pergamon: Oxford, 1975.
5. Рудобахта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: КолосС, 2010.
6. Alifanov O.M. Inverse Heat Transfer Problems. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, 1994.
7. Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfers in Porous Media: A Theory of Drying // Advances of Heat Transfer. – 1977, 13. P. 119...203.
8. Дорняк О.Р. Теплоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах: Дис... докт. техн. наук. – Воронеж: ВГТУ, 2007
9. Kosheleva M.K., Dorniyak O.R., Maklusova M.S. Modeling of kinetics of drying process of polycapramide granules considering its sorption properties // Proceedings 21st International Drying Symposium, València, Spain, September 11-14, – 2018. P. 387...394.
10. Кошелева М.К., Дорняк О.Р., Новикова Т.А. Исследование сорбционных свойств хлопчатобумажных тканей в технологических операциях отделки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, – 2016. № 3. С. 242...246.

11. Цимерманис Л.-Х.Б. Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела). – М.: Алекс, 2006.

12. Куц П.С., Ольшанский А. И. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов // Инженерно-физический журнал. – 1975. Т. 28. №4. С. 19...21.

13. Ольшанский А.И. Исследование процесса сушки плоских влажных материалов методом обобщенных переменных // Инженерно-физический журнал. – 2013. Т.86. №2. С. 66...76

14. Ольшанский А. И., Гусаров А. М. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных // Инженерно-физический журнал. – 2017. Т.90. №3. С. 700...717.

REFERENCES

1. Mujumdar, A.S. Handbook of Industrial Drying. Marcel Dekker: New York, 1995.
2. Kudra T; Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. Marcel Dekker: New York, 2007.
3. Kosheleva M.K., Golykh R.N., Novikova T.A., Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov, A.V. Ultrasonic drying of textile materials // In Proceedings of 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol. – 2017. P. 283...289.
4. Luikov A.V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies ; Pergamon: Oxford, 1975.
5. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffusion in chemical-technological processes. – Ed. 2nd, revised. and additional – M.: KolosS, 2010.
6. Alifanov O.M. Inverse Heat Transfer Problems. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, 1994.
7. Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfers in Porous Media: A Theory of Drying // Advances of Heat Transfer. - 1977, 13. P. 119 ... 203.
8. Dorniyak O.R. Heat and Mass Transfer in Unsaturated Colloidal Capillary-Porous Anisotropic Materials: Dis... doc. tech. Sciences. - Voronezh: VSTU, 2007
9. Kosheleva M.K., Dorniyak O.R., Maklusova M.S. Modeling of kinetics of drying process of polycapramide granules considering its sorption properties // Proceedings 21st International Drying Symposium, València, Spain, September 11-14, – 2018. P. 387...394.
10. Kosheleva M.K., Dorniyak O.R., Novikova T.A. Research of sorption properties of cotton fabrics in technological operations of finishing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.- 2016. No. 3. P. 242 ... 246.
11. Tsimermanis L.-H.B. Sorption, structure formation, mass transfer (wet body thermodynamics). – M.: Alex, 2006.
12. Kuts P.S., Olshansky A.I. On the issue of an approximate method for calculating the kinetics of

convective drying of flat materials // Engineering and Physical Journal. - 1975. V. 28. No. 4. S. 19...21.

13. Olshansky A.I. Investigation of the drying process of flat wet materials by the method of generalized variables. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2013. T.86. No. 2. S. 66...76

14. Olshansky A. I., Gusarov A. M. Experimental study of the kinetics of drying thin flat wet materials by the regular mode method using generalized complex

variables // Engineering Physics Journal. - 2017. T.90. Number 3. S. 700...717.

Рекомендована кафедрой энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 15.06.22.
