

УДК 536.24:677.027.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ХЛОПЧАТОБУМАЖНЫХ ТКАНЕЙ

© 2024 г. М. К. Кошелева^а, О. Р. Дорняк^{б, *}

^а *Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
Москва, Россия*

^б *Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, Воронеж, Россия*
** e-mail: oxtpaxt@yandex.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.

После доработки 28.01.2024 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Представлена математическая модель тепло- и массопереноса в процессе конвективной сушки ткани в химической технологии ее отделки. Уравнения записаны для теплофизических переменных, усредненных по объему образца. Модель контролирует состояние воды в капиллярно-пористой системе и учитывает течение жидкой фазы в связанном состоянии, свободная вода неподвижна. Изменение концентрации свободной воды может происходить за счет фазовых переходов на границах жидкой и газообразной фаз. Математическая модель может рассматриваться как вариант известной модели диффузионного тепло- и массопереноса А.В. Лыкова с определенными дополнениями. Кроме уравнений теплопроводности, теплопроводности и общего давления, в модель включено уравнение для концентрации паровой компоненты газообразной фазы. Для локальных значений коэффициента диффузии жидкой фазы и критерия фазового перехода используются аналитические зависимости этих величин от влагосодержания и температуры. Математическая модель исследована численно с помощью метода конечных разностей. Валидация модели проведена с использованием данных лабораторного эксперимента для образцов ткани из хлопка различной плотности, толщины и способов плетения. Расчеты кривых сушки по предложенной модели показали удовлетворительное совпадение с опытными зависимостями. Исследован вклад в процесс высушивания ткани двух механизмов массопереноса, связанных с фазовыми переходами и капиллярными течениями жидкой фазы.

Ключевые слова: ткань, конвективная сушка, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0040357124010042, **EDN:** ZEGVBH

ВВЕДЕНИЕ

Процесс сушки является одним из самых затратных по количеству потребляемой энергии среди операций отделки тканей [1]. Проектирование энергоэффективных режимов сушки, обеспечивающих высокое качество продукции, требует теоретического и экспериментального изучения процессов тепло- и массопереноса [2].

Еще несколько десятилетий назад выдающийся советский химик-технолог, член-корреспондент АН СССР Петр Григорьевич Романков определил огромное значение глубокого изучения процессов десорбции [3–4]. Сегодня также актуально звучит его выступление о направлении развития теории сорбционных процессов, которое “...должно идти по пути детального изучения физической модели процесса (с учетом пористой структуры сорбента), его кинетических законо-

мерностей, накопления адсорбционных констант и разработки математических моделей адсорбционных и десорбционных процессов, на основе которых должны быть созданы инженерные методы расчета и управления с использованием ЭВМ” [4].

Ткани на основе натуральных хлопковых волокон относятся по своим свойствам к коллоидным капиллярно-пористым телам [5]. Исследование закономерностей процессов тепло- и массопереноса в таких телах остается сложной задачей, для решения которой применяются различные методы [5–7].

Выделяются три основных методологических подхода к теоретическому изучению таких процессов в условиях термодинамического равновесия. Авторы, применяющие первый подход, рассматривают материал как гомогенный. При этом

уравнения переноса записываются для теплофизических переменных, усредненных по объему образца [5]. Более глубокое изучение закономерностей тепло- и массопереноса позволяют выполнить математические модели, основанные на втором подходе, когда объект сушки представляется как гетерогенная среда, а уравнения переноса формулируются для теплофизических переменных, усредненных по отдельным фазам высушиваемой среды (жидкой, твердой и газообразной) [8]. Третий подход применяется, если интенсивность взаимодействия фаз невелика. В этом случае используются модели многофазной фильтрации [9–10], когда параметры отдельных фаз текучей сплошной среды, заполняющей поровое пространство, усредняются по объему этого пространства. Для моделирования процесса сушки текстильных материалов применяются все три подхода [11–16]. Отметим, что в инженерной практике часто применяются кинетические модели сушки [1, 17–19].

Важнейшим элементом любой математической модели сушки является соотношение для определения интенсивности фазовых переходов вода–пар. Наиболее последовательно задача описания явлений на границе раздела фаз может быть выполнена на основе механики гетерогенных систем с применением уравнения Герца – Кнудсена – Ленгмюра [8]. Применительно к процессу сушки тканей данное уравнение использовано в математической модели [16]. Эта модель учитывает также различные механизмы удаления связанной и свободной воды из капиллярно-пористого материала при сушке и позволяет прогнозировать деформацию усадки материала. Математическая модель, разработанная в [16], является достаточно сложной для анализа. В данной работе рассматривается ее однотемпературное приближение, которое, возможно, более удобно для применения в инженерной практике. Уравнения переноса близки по форме к уравнениям диффузионно-фильтрационной модели А. В. Лыкова [5]. При этом локальные значения коэффициентов массопроводности и интенсивности фазовых переходов определены аналитически. Математическая модель такого типа применялась для численного исследования процессов сушки гранул поликапроамида [20] и носителя

никелевого катализатора [21], а также керамических материалов [22].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Образец ткани помещается в конвективную сушильную камеру с заданными постоянными характеристиками сушильного агента – температурой T_c и относительной влажностью ϕ_c . Предположим, что поля влагосодержания, температуры, общего давления и концентрации пара однородны в направлении, перпендикулярном поверхности образца, и для изучения процессов переноса достаточно рассмотреть задачу в одномерном приближении.

Уравнение влагопроводности в образце записывается в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (a_m \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{s_{12} j}{\alpha_3 \rho_3^0}. \quad (1)$$

Локальный коэффициент диффузии a_m жидкой фазы зависит от переменных значений влагосодержания, температуры и проницаемости [20–22]:

$$a_m = \frac{\Psi_2 K_{23}}{\mu_2} \cdot \frac{RTu}{V_2'} \cdot \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial u}. \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности записано в следующей форме:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + L\varepsilon \rho \frac{\partial u}{\partial t};$$

$$c\rho = c_{p1}\rho_1^0\alpha_1 + c_{p2}\rho_2^0\alpha_2 + c_{p3}\rho_3^0\alpha_3,$$

$$\lambda = \alpha_1\lambda_1 + \alpha_2\lambda_2 + \alpha_3\lambda_3. \quad (3)$$

Объемные концентрации фаз могут быть вычислены приближенно с использованием соотношений:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 - \alpha_3; \quad \alpha_2 \approx u\alpha_3\rho_3^0/\rho_2^0; \quad \alpha_3 \approx \rho_0/\rho_3^0. \quad (4)$$

Здесь ρ_0 – плотность сухого материала. Коэффициент фазовых переходов ε зависит от влажности, температуры и давления пара [20–22]:

$$\varepsilon = \frac{c_{v1}}{L} \frac{1}{1+u} (T - T_{sat}(p_{1V})). \quad (5)$$

Уравнение давления парогазовой смеси имеет вид [22]:

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = p_1 \frac{K_{13}}{\mu_1} \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \frac{p_1}{T} \frac{\partial}{\partial x} (a \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{p_1}{T} \frac{L\varepsilon}{c} \frac{\partial}{\partial x} (a_m \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{p_1}{B_1} \frac{\partial B_1}{\partial t} - \frac{p_1}{\alpha_1} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \frac{s_{12} j TB_1}{\alpha_1} - \frac{p_1}{T} \frac{L\varepsilon}{c} \frac{s_{12} j}{\alpha_3 \rho_3^0}. \quad (6)$$

Для вычисления полей концентраций паровой и газовой компоненты в паровоздушной фазе

($\chi = \rho_{1V}^0/\rho_1^0$ и $1 - \chi = \rho_{1g}^0/\rho_1^0$) используется следующее уравнение:

$$\frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1 (1 - \chi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1 (1 - \chi)(v_1 + w_{1g}))}{\partial x} = 0;$$

$$w_{1g} = \frac{\rho_1^0}{\rho_{1g}^0} D \frac{\partial \chi}{\partial x}; \quad v_1 = -\frac{K_{13}}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial x}, \quad (7)$$

где v – скорость, м/с; w – диффузионная скорость, м/с; D – коэффициент бинарной диффузии, м²/с. Индексы 1V и 1g относятся к паровой и газовой компонентам соответственно.

Уравнения состояния идеального газа для смеси и ее компонент имеют вид:

$$p_1 = \rho_1^0 T B_1; \quad p_{1g} = \rho_{1g}^0 T B_{1g}; \quad p_{1V} = \rho_{1V}^0 T B_{1V};$$

$$B_1 = \chi B_{1V} + (1 - \chi) B_{1g}; \quad \rho_1^0 = \rho_{1V}^0 + \rho_{1g}^0. \quad (8)$$

Интенсивность фазовых переходов, определяемая в многофазной модели с помощью соотношения Герца – Кнудсена – Ленгмюра [8], после предельного перехода к однотемпературной модели записывается следующим образом:

$$j = \frac{\kappa_2 [p_{sat}^0(T) \varphi - p_{1V}(T)]}{\sqrt{2\pi B_{1V} T_{sat}(p_{1V})}}. \quad (9)$$

В результате предельного перехода формула (9) уже не имеет первоначального физического смысла, связанного с оценкой разности молекулярных потоков от поверхности жидкости в пар и обратно, а величина κ_2 – не является коэффициентом аккомодации. Значение j вычисляется, таким образом, по аналогу известной формулы Дальтона, но с учетом снижения десорбционной активности жидкой фазы, адсорбированной в пористой системе, по сравнению с объемной жидкостью. Для определения давления насыщенного пара при данной температуре используется известная формула Антуана, которая аппроксимирует кривую фазовых переходов 1 рода в диапазоне изменения температуры 284–441 К:

$$p_{sat}^0 = e^{A_s - B_s / (T + C_s)}. \quad (10)$$

Здесь величина p_{sat} имеет размерность мм рт. ст. Константы в (10) имеют следующие значения $A_s = 18.3036$; $B_s = 3816.44$; $C_s = -46.13$.

Начальные условия задают произвольное распределение зависимых переменных:

$$u(0, x) = u_0(x); \quad T(0, x) = T_0(x);$$

$$p_1(0, x) = p_{10}(x); \quad \chi(0, x) = \chi_0(x). \quad (11)$$

Влагосодержание на границах образца соответствует своим равновесным значениям при соответствующих значениях температуры и относительной влажности сушильного агента:

$$u|_{x=0} = f(T_c, \varphi_c), \quad u|_{x=H} = f(T_c, \varphi_c), \quad (12)$$

где H – толщина образца, м. Отметим, что функция $\chi_0(x)$ в (11) не может быть задана произволь-

но. Концентрация пара в образце однозначно определяется величиной относительной влажности воздуха, которая в равновесных условиях связана с влагосодержанием материала уравнениями политермы сорбции (12).

Для температуры на внешних границах составного образца ставятся условия Ньютона – Рихмана:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha^\Gamma (T|_{x=0} - T_c);$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=H} = -\alpha^\Gamma (T|_{x=H} - T_c), \quad (13)$$

где α^Γ – коэффициент теплоотдачи от образца к сушильному агенту, Вт/(м²К).

Граничные значения давления парогазовой смеси и концентрации каждой из ее компонент в капиллярно-пористом образце полагаются равными соответствующим значениям в сушильной камере:

$$\chi|_{x=0} = \chi_c; \quad p_1|_{x=0} = p_c; \quad \chi|_{x=H} = \chi_c; \quad p_1|_{x=H} = p_c. \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Система уравнений (1)–(14) исследована численно после приведения к безразмерному виду. Дискретный аналог уравнений в частных производных построен методом контрольного объема [23]. Вычислительный алгоритм является итерационным в связи с нелинейностью поставленной задачи. Алгоритм реализован в среде MatLab. Верификация программного комплекса проведена на основе ряда точных решений уравнений с дополнительными источниковыми членами. Расчеты на сгущающихся сетках подтвердили сходимость алгоритма.

Приняты следующие значения теплофизических параметров.

Водяной пар и воздух: $R = 8.3144$ Дж/(моль К); $B_{1v} = 461.9$ Дж/(кг К); $B_{1g} = 284$ Дж/(кг К); $\lambda_1 = 0.0248$ Вт/(м К); $c_{p1v} = 2.034 \times 10^3$ Дж/(кг К); $c_{p1g} = 9.05 \times 10^2$ Дж/(кг К); $c_{v1v} = 1.58 \times 10^3$ Дж/(кг К); $c_{v1g} = 7.07 \times 10^2$ Дж/(кг К); $p_{atm} = 1.013 \times 10^5$ Па; $\mu_1 = 10^6$ Па·с; $D = 2.16 \times 10^5$ м²/с.

Вода: $\rho_2^0 = 10^3$ кг/м³; $\mu_2 = 10^{-3}$ Па·с; $V_2' = 18 \times 10^6$ м³/моль; $\lambda_2 = 0.648$ Вт/(м К); $c_2 = 4.2 \times 10^3$ Дж/(кг К); $L = 2.25 \times 10^6$ м³/моль; $\kappa_{12} = 0.01$.

Твердая фаза (хлопковое волокно): $\rho_3^0 = 1380$ кг/м³; $\lambda_3 = 0.04$ Вт/(м град); $c_3 = 1.3 \times 10^3$ Дж/(кг К); $K_{13} = 10^{21}$ м²; $s_{12} = 1.14 \times 10^5$ м⁻¹. Параметры, отличающиеся для разных видов тканей, приведены в таблице.

Таблица. Значения расчетных параметров для образцов ткани

Вид ткани	Поверхностная плотность, M , г/м ²	Толщина, H , мм	Начальная влажность по данным опытов, u_0 , кг/кг	Объемная концентрация твердой фазы α_3	Коэффициент проницаемости $K_{23} \cdot 10^{-24}$, м ²
Ситец	106	0.35	1.33	0.17	0.6
Бязь	145	0.53	1.7	0.2	1
Бумазея	189	0.5	2.26	0.27	0.4
Спецодежда	482	1.34	1.43	0.26	4

Для описания сорбционных возможностей ткани принято уравнение Л. Б. Цимерманиса, полученное в [24] на основе термодинамического анализа. Для типичных капиллярно-пористых тел это уравнение имеет вид:

$$u = u_{\text{МГ}} \varphi^{a_0 k^0}, \quad u_{\text{МГ}} = u_{S0} - \alpha_{\text{СТ}}(T - 293), \quad (17)$$

где u – равновесное влагосодержание; φ – относительная влажность воздуха; a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые, соответственно, структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи; $u_{\text{МГ}}$ – максимальное гигроскопическое влагосодержание; u_{S0} – максимальное гигроскопическое содержание при $T = 293$ К, $\alpha_{\text{СТ}}$ – безразмерный коэффициент.

На основе опытной изотермы сорбции с использованием метода наименьших квадратов определены постоянные уравнения изотермы сорбции (17): $a_0 = 0.8474$; $k = 7.824$; $u_{S0} = 0.286$;

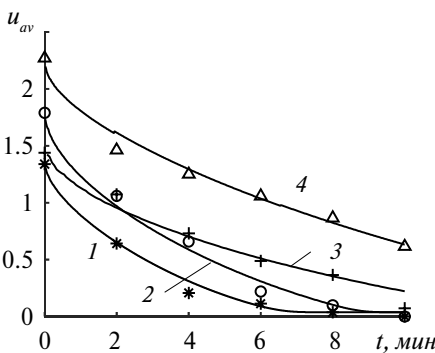


Рис. 1. Зависимость среднего влагосодержания $u_{\text{ав}}$, кг/кг от времени при сушке образцов ткани для $T_c = 320$ К, $\varphi_c = 0.25$: ситец – 1; бязь – 2; ткань для спецодежды – 3; бумазея – 4. Непрерывные кривые – расчет, маркированные – эксперимент.

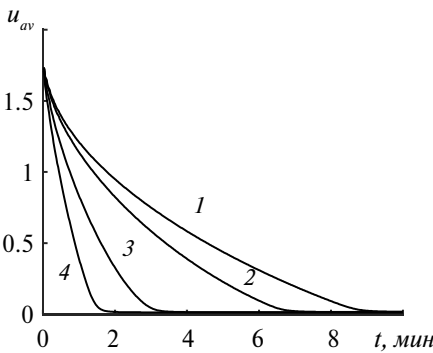


Рис. 2. Изменение со временем среднего влагосодержания $u_{\text{ав}}$, кг/кг при сушке ткани (бязь) для различных значений температуры сушильного агента: $T_c = 300$ К – 1, 320–2, 350–3, 370–4. Значение $\varphi_c = 0.05$.

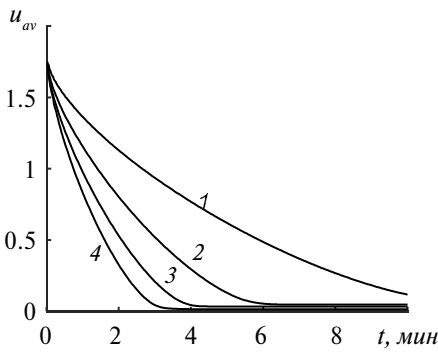


Рис. 3. Изменение со временем среднего влагосодержания $u_{\text{ав}}$, кг/кг при сушке ткани (бязь) для различных значений относительной влажности сушильного агента: $\varphi_c = 0.75$ –1, 0.5–2, 0.25–3, 0.05–4. Значение $T_c = 350$ К.

$\alpha_{\text{СТ}} = 0.76 \times 10^3$ [25]. Коэффициент теплоотдачи от образца к сушильному агенту α^{Γ} вычислялся по числу Нуссельта для вынужденной конвекции согласно эмпирической формуле А. В. Нестеренко, в зависимости от чисел Рейнольдса и Прандтля [5]. Среднее значение $\alpha^{\Gamma} = 248$ Вт/(м²К), оно соответствует числу Био, определенному по толщине образца, равному ~ 3 . Скорость сушильного агента $V_c = 1.7$ м/с.

Валидация математической модели осуществлена на основе сравнения результатов расчетов и лабораторных экспериментов по конвективной сушке хлопчатобумажных тканей различной плотности, подвергнутых разным стадиям химической технологии отделки. Экспериментальные исследования проведены на кафедре процессов и аппаратов химической технологии МГТУ им. А. Н. Косыгина. Сравнивая расчетные кривые сушки и данные опытов для тканей различной плотности и толщины (рис. 1), можно сделать вывод об их удовлетворительном совпадении.

На рис. 2–4 представлены результаты численного анализа модели, иллюстрирующие особенности процессов тепло- и массопереноса при конвективной сушке тканых материалов из хлопка.

Как видно из рис. 2–3, изменение параметров сушильного агента существенно влияет на интенсивность процесса сушки хлопчатобумажной ткани. С ростом температуры и понижением относительной влажности сушильного агента длительность процесса сушки уменьшается, что обусловлено, в частности, увеличением интенсивности парообразования в тех зонах образца ткани, где вода находится в свободной форме. Как видно из рис. 2–3, образец приобретает равновесную влажность более чем в 2 раза быстрее, если значение φ_c снизить с 0.5 до 0.05 (при

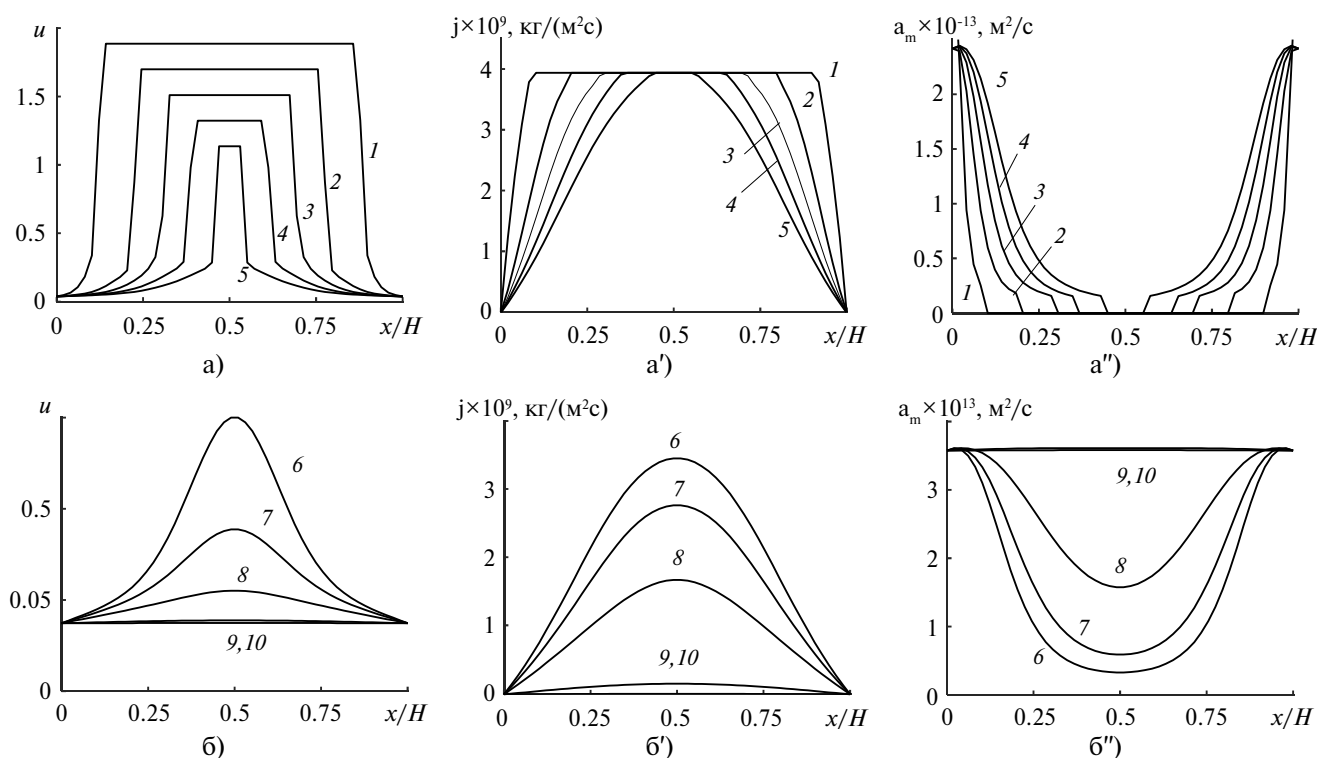


Рис. 4. Распределение влагосодержания u , кг/кг (а, б), интенсивности фазовых переходов j , кг/(м²·с) (а', б'), коэффициента массопроводности жидкой фазы a_m , м²/с (а'', б'') при сушке образца ткани (бязь) для режима $T_c = 320$ К, $\varphi_c = 0.25$ в различные моменты времени $t = 0.56$ мин – 1, 2.22 – 2, 3.89 – 3, 5.56 – 4, 7.22 – 5, 8.33 – 6, 8.61 – 7, 8.89 – 8, 9.47 – 9, 10 – 10.

$T_c = 350$ К) или повысить температуру сушильного агента T_c с 320 К до 350 К (при $\varphi_c = 0.05$).

Профили влагосодержания по толщине материала имеют качественно разный вид на различных этапах сушки (рис. 4а–б). Выделяется два характерных временных интервала. Первый период, когда влагосодержание во всех зонах, исключая тонкий слой на внешней границе образца, превышает значение максимального гигроскопического влагосодержания $u > u_{\text{МГ}}$. Второй период, когда по всему сечению значение влагосодержания $u < u_{\text{МГ}}$. В первом периоде профиль влагосодержания имеет горизонтальный участок в центре (рис. 4а), который соответствуют области материала, где в системе пор и капилляров присутствует вода в свободной форме. В отсутствии внешних сил, как известно, эта вода неподвижна. За счет испарения количество свободной воды постепенно снижается. Интенсивность испарения максимальна в зонах свободной воды и минимальна вблизи границ образца в ненасыщенных зонах (рис. 4а'). Это связано с тем, что давление насыщенного пара в данной точке образца, в соответствии с уравнением (9), зависит от относительной влажности паровоздушной смеси $\varphi(t, x)$. Над поверхностью свободной воды оно максимально, $\varphi = 1$. Над поверхностью смазывающих пленок в ненасыщенной области зна-

чение упругости паровой компоненты снижается к внешним границам в соответствии с уменьшением влагосодержания.

Из графиков на рис. 4а видно, что со временем зона свободной воды также уменьшается по ширине. Этот эффект обусловлен жидкофазным переносом в областях с влагосодержанием $u < u_{\text{МГ}}$ за счет градиента расклинивающего давления. Коэффициент массопроводности a_m в зоне свободной воды в соответствии с (2) равен нулю и возрастает по направлению к внешним границам (рис. 4а'').

Во втором периоде профиль влагосодержания уже имеет вид параболы (рис. 4б). При этом плотность потока массы паровой компоненты j по своим значениям также существенно выше в центральной зоне, где более высокая относительная влажность паровоздушной смеси (рис. 4б'). Сравнивая кривые интенсивности парообразования на рис. 4а' и 4б', можно сделать вывод о снижении производства массы пара во втором периоде по сечению в целом.

Построенная математическая модель учитывает, что a_m – коэффициент массопроводности материала (за счет жидкофазного переноса) изменяется во времени и в пространстве при изменении влагосодержания и температуры капиллярно-пористого материала. Расчеты показывают суще-

ственное качественное различие распределения локальных значений a_m по сечению в двух периодах процесса сушки (рис. 4а" и 4б"). Нулевое значение коэффициента диффузии жидкой фазы наблюдается в зоне, где вода находится в свободном состоянии ($u > u_{\text{МГ}}$) – рис. 4а". Как видно из графиков рис. 4б", при $u < u_{\text{МГ}}$ коэффициент массопроводности растет со временем в каждой точке сечения образца. На заключительном этапе сушки формируется однородное распределение коэффициента массопроводности a_m (кривые 9, 10 на рис. 4б"), но на этой стадии массоперенос жидкой фазы незначителен по интенсивности, поскольку концентрация сорбента уже весьма мала (кривые 9, 10 на рис. 4а).

Таким образом, моделирование процесса конвективной сушки хлопчатобумажной ткани на основе математической модели (1)–(14) позволяет установить, что десорбция влаги в тонком материале осуществляется за счет фазовых переходов и течения жидкости в граничных слоях. Оба механизма являются значимыми практически на всем протяжении процесса сушки, определяя закономерности изменения локальных значений влагосодержания плоского тканого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена математическая модель тепло- и влагопереноса для описания процессов тепло- и массопереноса при конвективной сушке хлопчатобумажных волокнистых материалов. Модель численно исследована с использованием метода контрольного объема. Результаты численных расчетов кривых сушки с удовлетворительной точностью совпадают с данными опытов. Математическая модель учитывает вклад двух механизмов массопереноса при сушке – диффузию связанной влаги за счет капиллярных явлений и фазовые переходы на границах жидкой и газообразной фаз. Показано, что распределения по сечению влагосодержания, значения интенсивности фазовых переходов и локальных коэффициентов внутреннего переноса жидкой фазы в рассмотренных режимах конвективной сушки тканого материала существенно неоднородны и изменяются со временем. Математическая модель и результаты ее исследования могут быть использованы при выборе эффективных режимов конвективной сушки различных тканых материалов.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A_s, B_s, C_s	коэффициенты в формуле Антуана
a	коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$
a_m	коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$
a_0	коэффициент уравнения политермы сорбции

B	индивидуальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг К})$
c	теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг К})$
D	коэффициент бинарной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$
f	функция политермы сорбции
H	толщина ткани, м
j	поток массы пара, обусловленный фазовыми переходами, отнесенный к единице времени и единице площади, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$
K_{j3}	коэффициент проницаемости j -й фазы при полном насыщении пористой системы, м^2
k	коэффициент уравнения политермы сорбции
L	скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$
p	давление, Па
R	универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль К})$
s_{ij}	удельная поверхность раздела фаз i и j , м^{-1}
T	температура, К
t	время, с
u	влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$
$u_{\text{с0}}$	максимальное гигроскопическое содержание при $T=293 \text{ К}$, $\text{кг}/\text{кг}$
V'_2	молярный объем жидкости, $\text{м}^3/\text{моль}$
v	скорость, $\text{м}/\text{с}$
w	диффузионная скорость, $\text{м}/\text{с}$
x	координата, перпендикулярна поверхности ткани, м
α	объемное содержание фазы
$\alpha^{\text{Г}}$	коэффициент теплоотдачи на внешней границе образца, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$
$\alpha_{\text{ст}}$	коэффициент уравнения политермы сорбции
ε	критерий фазовых переходов
κ_2	коэффициент в формуле Дальтона
λ	коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м К})$
μ	вязкость, Па с
ρ	плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
φ	относительная влажности воздуха
χ	концентрация пара в парогазовой среде
Ψ_i	относительная проницаемость i -й фазы

ИНДЕКСЫ

1, 2, 3	газообразная, жидкая и твердая фазы
0	начальное состояние
lg	газовая компонента
atm	атмосферное
1V	пар
av	среднее
c	среда сушильного агента
МГ	максимальное гигроскопическое влагосодержание
p	при постоянном давлении

sat	состояние насыщения
V	при постоянном объеме
°	истинное значение физической величины

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сажин Б.С., Кошелева М.К., Сажина М.Б. Процессы сушки и промывки текстильных материалов / Под ред. Б. С. Сажина. М.: ФГБОУ ВПО Московский государственный университет дизайна и технологий, 2013.
2. Romankov P.G. Theory and practice of drying and adsorption // Theor. Found. Chem. Eng. 1987. V. 21. № 1. P. 9. [Романков П. Г. Теория и практика промывки и адсорбции // Теорет. основы хим. технологии. 1987. Т. 21. № 1. С. 9.]
3. Романков П.Г. Актуальные задачи теории и практики адсорбционных процессов. Адсорбенты, их получение, свойства и применение // Сб. тр. IV Всесоюзного совещания по адсорбентам / Акад. наук СССР. Отделение общей и технической химии. Л.: Наука, 1978. С. 170.
4. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1974.
5. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1973.
6. Павлюкевич Н.В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах // Сб. тр. Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ. Минск, 2003. С. 140.
7. Алиев Р.З., Романков П.Г., Медведев А.А. Флуктуационно-релаксационная диффузионная модель пористой среды, уравнения нестационарного переноса // Сб. тр. Акад. наук СССР. Отделение общей и технической химии. Л.: Наука, 1965. С. 147.
8. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
9. Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfers in Porous Media // A Theory of Drying. Advances of Heat Transfer. 1977. V. 13. P. 119.
10. Гринчик Н.Н., Акулич П.В., П.С. Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76. № 6. С. 129. [Grinchik, N.N., Akulich, P.V., Kuts, P.S. Terechov V.I. On the problem of nonisothermal mass transfer in porous media. // J. Eng. Phys. Thermophys. 2003. V. 76. № 6. P. 129.]. <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000012041.81528.02>
11. Johann G., Silva E., Lima O.C., Pereira, N. Mathematical modeling of a convective textile drying process // Brazilian J. of Chem. Eng. 2014. V. 31. № 4. P. 959. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140314s00002685>
12. Etemoglu A.B., Ulcay Y., Can M., Avci, A. Mathematical modelling of combined diffusion of heat and mass transfer through fabrics // Fib. Polymers. 2009. V. 10. № 2. P. 252. <https://doi.org/10.1007/s12221-009-0252-0>
13. Lee H.S., Carr W.W., Beckham H.W., Leisen, J. A model of through-air drying of tufted textile materials // Int. J. Heat Mass. Transfer. 2002. V. 45. № 2. P. 357. [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(01\)00130-2](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(01)00130-2)
14. Li Yi., Zhu Q., Yeung K. Influence of thickness and porosity on coupled heat and liquid moisture transfer in porous textiles // Text. Res. J. 2002. V. 72. № 5. P. 435. <https://doi.org/10.1177/004051750207200511>
15. Wang S., Zhang H., Chen H., Zhong Y., Yue X. A numerical model of the open-width coupling drying process for cotton fabrics based on the theory of heat and mass transfer in porous media // Text. Res. J. 2019. V. 90. № 13–14. P. 1639. <https://doi.org/10.1177/0040517519891706>
16. Дорняк О.Р., Кошелева М.К. Математическая модель сушки тканых материалов // Тез. Док. 15 Минский меж. форум по тепло- и массообмену. Минск, 2016. С. 120.
17. Kononov V.I., Romankov P.G., Sokolov V.N., Pasako A. P. Approximate models of the kinetics of convective drying of thin materials // Theor. Found. Chem. Eng. 1975. V. 9 № 4. P. 501. [Коновалов В.И., Романков П.Г., Соколов В.Н., Пасяко А.Р. Приближенные модели кинетики конвективной сушки тонких материалов // Теорет. основы хим. технологии. 1975. Т. 9. № 4. С. 501.]
18. Олышанский А.И., Марущак А. С. Новый метод расчета кинетики процесса сушки тканей // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2021. № 1. С. 72.
19. Kosheleva M.K., Belgorodsky V.S., Kulov N.N. Analytical review of the materials of the international scientific and technical symposium Improving energy efficiency and environmental safety of processes and devices of chemical and related industries, dedicated to the 110th anniversary of A. N. Planovsky // Theor. Found. Chem. Eng. 2022. V. 56. № 3. P. 267. [Кошелева М.К., Белгородский В.С., Кулов Н.Н. Аналитический обзор материалов международного научно-технического симпозиума Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности, посвященного 110-летию А. Н. Плановского // Теорет. основы хим. технологии. 2022. Т. 56. № 3. С. 267.]
20. Kosheleva M.K., Dorniyak O.R., Maklusova M.S. Modeling of kinetics of drying process of polycapromide granules considering its sorption properties. IDS2018. Proceedings 21st International Drying Symposium. 2018. С. 387. <https://doi.org/10.4995/ids2018.2018.7553>
21. Kosheleva M.K., Meshalkin V.P., Dorniyak O.R. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the drying of granules used as a support for a nickel catalyst // Theor. Found. Chem. Eng. 2021. V. 55. № 3. P. 339. <https://doi.org/10.31857/S0040357121030258> [Кошелева М.К., Мешалкин В.П., Дорняк О.Р. Математическое моделирование тепло- и массопереноса при сушке гранул носителя для никелевого катализатора // Теорет. основы хим. технологии. 2021. Т. 55. № 3. С. 339.]
22. Дорняк О.Р., Усачев А.М., Шмитько Е.И., Аль Сарраджи С. Х.М. Математическое моделирование тепло- и массопереноса при адсорбционно-контактной сушке керамических материалов (математическая модель) // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 89. С. 655.

23. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences, Hemisphere, New York, 1980. [Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.].
24. Цимерманис Л.Х.Б. Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела). М.: Алекс, 2006.
25. Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Novikova T.A. The research of the sorption properties of cotton fabrics in the technological operations of finishing // Izv. universities. Technology of the textile industry. 2016. V. 363. № 3. P. 242. [Кошелева М.К., Дорняк О.Р., Новикова Т.А. Исследование сорбционных свойств хлопчатобумажных тканей в технологических операциях отделки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. Т. 363. № 3. С. 242.].