

УДК 666.972.17:519.8

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ
ТЕКСТИЛЬНОЙ И СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ***

**THEORETICAL FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER
IN THE EMERGING TECHNOLOGIES OF PRODUCTION
OF MATERIALS FOR THE TEXTILE AND CONSTRUCTION INDUSTRIES**

С.В. ФЕДОСОВ, М.В. АКУЛОВА, С.А. КОКШАРОВ, О.В. МЕТЕЛЕВА
S.V. FEDOSOV, M.V. AKULOVA, S.A. KOKSHAROV, O.V. METELEVA

(Ивановский государственный политехнический университет,
Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново)
(Ivanovo State Polytechnic University,
Institute of Solution Chemistry of RAS named after G.A. Krestov, Ivanovo)
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru; m_akulova@mail.ru

Рассмотрены особенности тепловых и массообменных процессов в технологиях текстильной и легкой промышленности, а также строительной индустрии. Отмечено сходство математического аппарата при моделировании процессов теплопереноса в пористой структуре волокнистого материала и бетонного камня. Определены ключевые направления создания научно-технического задела для последующей разработки реализуемых в швейном производстве и строительной индустрии технологий получения материалов с новыми или улучшенными эксплуатационными свойствами.

The features of heat and mass transfer processes in technologies of textile and light industry, as well as the construction industry. Noted the similarity of the mathematical device in the modeling of processes of heat transfer in a porous

* Исследования выполнены в рамках государственного задания № 11.1898.2014/К Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности.

structure of fibrous material and concrete blocks. Provides key avenues of establishing scientific and technical reserve for future development in the construction industry and clothing manufacture technologies of materials with new or improved performance characteristics.

Ключевые слова: тепломассоперенос, технология, текстильная промышленность, строительная отрасль.

Keywords: heat and mass transfer, technology, textile industry, construction industry.

В современной технологии производства волокнистых, тканевых и нетканых материалов, предназначенных для текстильной [1...5], химической [6], [7] и строительной [8...10] отраслей промышленности, наиболее широко применяемыми способами интенсификации тепломассопереноса в процессах придания материалам и изделиям необходимых свойств (водоотталкивание, хемостойкость, деформационная устойчивость, повышение прочности на истирание, разрыв и т.д.) являются различные виды термических воздействий: нагревание, охлаждение, обжиг и отжиг, тепловлажностная обработка, наложение полей токов высокой и сверхвысокой частоты и др.

При этом, несмотря на имеющиеся различия в видах переплетения (рис. 1 – основные виды тканевых переплетений: а – полотняное; б – атласное; в – репсовое), с

позиций физического моделирования все многообразие тканых материалов может быть представлено двумя каноническими формами: пластина или цилиндр (неограниченных или ограниченных размеров).

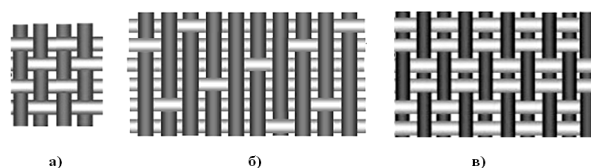


Рис. 1

Математически задачи переноса теплоты и массы вещества в цилиндрических нитях или пластинчатых телах могут быть представлены следующими нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа [5], [7], [9]:

$$\rho(t,u)c(t,u)\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t,u)\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right] + \lambda(t,u)\frac{\Gamma}{x}\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} + Q_T(x,\tau); \tau > 0; 0 \leq x \leq L, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(t,u)\frac{\partial u(x,\tau)}{\partial x} \right] + k(t,u)\frac{\Gamma}{x}\frac{\partial u(x,\tau)}{\partial x} + Q_M(x,\tau); \tau > 0; 0 \leq x \leq L. \quad (2)$$

Здесь $t(x,\tau)$, $u(x,\tau)$ – функции, определяющие поля температур (t) или массосодержаний (u) в материале твердой фазы (пластине, цилиндре), соответственно K или $кг/м^3$; ρ , c – плотность и теплоемкость твердой фазы, $кг/м^3$, $Дж/(кг \cdot К)$, в общем случае зависящие как от температуры, так и от массосодержания; λ , k – коэффициенты тепло- и массопроводности, $Дж/(с \cdot м \cdot К)$, $м^2/с$, также зависящие от температуры и массосодержания; Q_T , Q_M – мощности объемных источников (стоков)

теплоты (массы) в твердой фазе, обусловленные фазовыми или химическими превращениями, $Дж/(с \cdot м^3)$, $кг/(с \cdot м^3)$; L – координата (половина толщины пластины, радиус цилиндра), $м$; x – текущая координата, $м$; Γ – геометрический фактор, $\Gamma=0$ (для пластины); $\Gamma=1$ (для цилиндра).

Начальными условиями к уравнениям (1) и (2) будут функции, определяющие поля температур и массосодержаний в материале в момент времени, принимаемый за начало отсчета:

$$\begin{aligned} t(x, \tau)|_{\tau=0} &= t_0(x); \\ u(x, \tau)|_{\tau=0} &= u_0(x). \end{aligned} \quad (3)$$

В качестве граничных условий применяются, как правило, условия третьего рода (заметим, что условия третьего рода явля-

$$\beta [u_{nc}(\tau) - u_c(\tau)]|_{x=L} - k\rho_0 \left[\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} + \delta_T \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right] |_{x=L}. \quad (5)$$

Здесь α , β – соответственно коэффициенты тепло- и массообмена между материалом и средой (газовой или жидкой), Дж/(с·м²·К), м/с; ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; δ_T – коэффициент термодиффузии, 1/К; $u_{(nc)}$, $u_{(c)}$ – массосодержание переносимого компонента в сплошной фазе, соответственно у поверхности раздела фаз и в объеме сплошной среды, кг/м³; t_c – температура окружающей среды.

Для математического моделирования и разработки инженерных методов расчета удобно приведение задачи (1)...(5) к безразмерным переменным и получение ре-

ются обобщающими и легко преобразуются к условиям первого или второго рода):

$$\alpha [t_c(\tau) - t(x, \tau)|_{x=L}] = \lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} |_{x=L}, \quad (4)$$

шений в виде зависимости безразмерных температур и массосодержаний от критериев подобия. Для случая постоянных теплофизических свойств и коэффициентов переноса возможности реализации системы уравнений (1)...(5) могут быть проиллюстрированы с помощью рис. 2 (иллюстрация расчетов по задаче теплопроводности с граничными условиями первого вида. Значения числа Фурье: 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,1) и рис. 3 (иллюстрация к расчетам по задаче с граничными условиями второго вида. Значения числа Фурье: 1) 0,001; 2) 0,01; 3) 0,05; 4) 0,1; $K_i=0,1 \uparrow$).

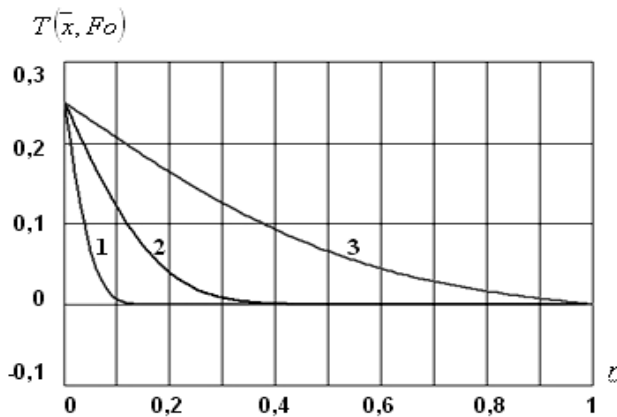


Рис. 2

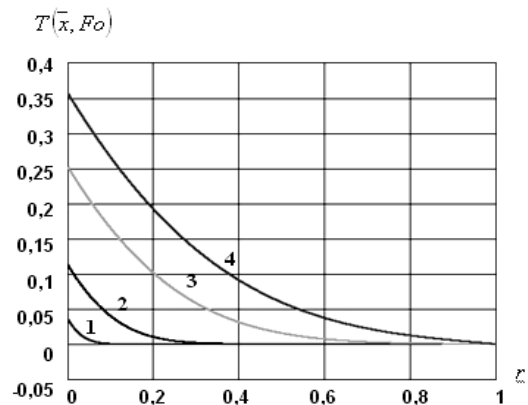


Рис. 3

Безразмерные величины и критерии подобия имеют следующий вид:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_0}, \quad U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x, \tau) - u_0}{u_0}, \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad Fo = \frac{a\tau}{L^2}, \quad Fo_m = \frac{k\tau}{L^2}, \quad ki = \frac{qL}{\lambda t_0}.$$

Здесь F_0 , F_{0m} – соответственно тепло- и массообменный критерии Фурье; ki – тепловой критерий Кирпичева.

Традиционно [7], [9], [11] результаты подобных расчетов интерпретируются с точки зрения влияния теплофизических свойств материалов на динамику полей их температур и массосодержаний.

Однако отметим, что в современных нетрадиционных технологиях для придания текстильным материалам [10], грунтам и фундаментам [11] защитных свойств непроницаемости влаги и/или других химических агрессивных реагентов необходимо решать проблемы пропитки (пенетрации) целевого компонента во внутренние слои материала.

При этом иногда оказывается достаточно обработать только поверхностные слои материала на небольшую глубину, а иногда требуется и более глубинная пропитка. Тем не менее, во всех случаях основу математического моделирования процессов пропитки составляет уравнение (2).

Основываясь на изложенных теоретических представлениях, определены ключевые направления реализации проекта "Разработка научно-технических основ технологии наноструктурной модификации полимерно-неорганических композиционных материалов для легкой промышленности и строительной индустрии" в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности. Создание научно-технического задела для последующей разработки реализуемых в швейном производстве и строительной индустрии технологий получения и применения конструкционных и функциональных материалов с новыми или улучшенными эксплуатационными свойствами предполагается осуществить на базе использования структурно-модифицированных полимерно-неорганических композиционных материалов, плазменного модифицирования поверхности рулонных материалов и полимерцементных композитов, а также протекания 3D- полимеризационных процессов формирования межфазного слоя композиционных материалов с участием нанопоровой структуры волокнистого носителя и нанодисперсных минеральных добавок. В части экспериментальных исследований планируются:

– выявление закономерностей массопереноса армирующих полимерных композиций в структуре волокнистых материалов, обладающих развитой

системой микро- и мезопор, и термоблагодаримого формирования межфазного слоя полимерно-волокнистых композитов для достижения технологических эффектов тонкого регулирования упругодеформационных характеристик формируемых деталей швейных изделий;

– оценка эффективности массопереноса вязкой клеевой полимерной композиции в элементах поверхностной структуры гидрофобных поверхностей защитных текстильных материалов и макроотверстиях ниточных соединений;

– исследование температурного интервала при тепловой интенсификации процесса импрегнирования клеевой полимерной композиции в макроотверстиях соединений защитных материалов;

– изучение механизма и скорости массопереноса вязкой клеевой полимерной композиции при кратковременном температурном воздействии для формирования блокировки элементов перфорации, образованных при стачивании деталей защитных текстильных изделий;

– оценка надежности блокирующего эффекта для обеспечения непроницаемости для различных сред соединений защитных текстильных материалов различного способа производства;

– исследование физических и физико-химических процессов, происходящих при плазменном воздействии на отделочные строительные материалы;

– исследование влияния тлеющего разряда на гидрофильные, адгезионные и декоративные свойства рулонных стеновых материалов;

– исследование влияния тлеющего разряда на прочностные свойства рулонных стеновых материалов вследствие их возможной деструкции;

– оценка сохранности полученных эффектов от воздействия тлеющего разряда на материалы во времени;

– исследование влияния различных пропиточных материалов на адгезионные и физико-механические свойства бетонов со стекловидным покрытием.

1. *Кричевский Г. Е.* Химическая технология текстильных материалов: Учеб. для вузов в 3-х т. – Т.3. Заключительная отделка текстильных материалов. – М.: РосЗИТЛП, 2001.

2. *Владимирцева Е.Л., Шарнина Л.В., Циркина О.Г.* Заключительная отделка гидрофобных тканей. Решение проблем пропитки и фиксации аппрета // Швейная промышленность. – 2009, № 5. С. 49...54.

3. *Абдель-Бари Е.М.* Полимерные пленки: технологии производства, деструкция и стабилизация, применение и рециклинг / Пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2005.

4. *Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др.* Полимерные композиционные материалы. Свойства, структура, технология / Под ред. Берлина А.А. – СПб.: Профессия, 2008.

5. *Федосов С.В., Мельников Б.Н., Акулова М.В. и др.* Применение тлеющего разряда в строительной и текстильной промышленности. – Иваново: ИГАСУ, 2008.

6. *Метелева О.В.* Теоретическое обоснование эффективного применения химических материалов при изготовлении защитных швейных изделий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 4. С.109...113.

7. *Рудобахта С.П., Карташов Э.М.* Диффузия в химико-технологических процессах. – М.: Изд. КолосС, 2009.

8. *Баженов Ю.М.* Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий. – М.: Изд. АСВ, 2005.

9. *Федосов С.В.* Тепломассопереносы в технологических процессах строительной индустрии. – Иваново: ПресСто, 2010.

10. *Федосов С.В., Щепочкина Ю.А., Акулова М.В. и др.* Современные методы отделки стеновых строительных материалов. – Иваново: ИГАСУ, 2012.

11. *Федосов С.В., Алоян Р.М., Ибрагимов А.М.* Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов. – М.: Изд. АСВ, 2005.

1. *Krichevskij G. E.* Himicheskaja tehnologija tekstil'nyh materialov: Ucheb. dlja vuzov v 3-h t. – Т.3. Zakljuchitel'naja otdelka tekstil'nyh materialov. – М.: RosZITLP, 2001.

2. *Vladimirceva E.L., Sharnina L.V., Cirkina O.G.* Zakljuchitel'naja otdelka gidrofobnyh tkanej. Reshenie problem propitki i fiksacii appreta // Shvejnaja promyshlennost'. – 2009, № 5. S. 49...54.

3. *Abdel'-Bari E.M.* Polimernye plenki: tehnologii proizvodstva, destrukcija i stabilizacija, primenenie i recikling / Per. s angl. – SPb.: Professija, 2005.

4. *Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. i dr.* Polimernye kompozicionnye materialy. Svojtva, struktura, tehnologija / Pod red. Berlina A.A. – SPb.: Professija, 2008.

5. *Fedosov S.V., Mel'nikov B.N., Akulova M.V. i dr.* Primenenie tlejushhego razrjada v stroitel'noj i tekstil'noj promyshlennosti. – Ivanovo: IGASU, 2008.

6. *Meteleva O.V.* Teoreticheskoe obosnovanie jeffektivnogo primenjenja himicheskikh materialov pri izgotovlenii zashhitnyh shvejnyh izdelij // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2013, № 4. S.109...113.

7. *Rudobashta S.P., Kartashov Je.M.* Diffuzija v himiko-tehnologicheskikh processah. – М.: Izd. KolosS, 2009.

8. *Bazhenov Ju.M.* Proektirovanie predpriyatij po proizvodstvu stroitel'nyh materialov i izdelij. – М.: Izd. ASV, 2005.

9. *Fedosov S.V.* Teplomassoperenosa v tehnologicheskikh processah stroitel'noj industrii. – Ivanovo: PresSto, 2010.

10. *Fedosov S.V., Shhepochkina Ju.A., Akulova M.V. i dr.* Sovremennye metody otdelki stenovyh stroitel'nyh materialov. – Ivanovo: IGASU, 2012.

11. *Fedosov S.V., Alojjan R.M., Ibragimov A.M.* Promerzanie vlazhnyh gruntov, osnovanij i fundamentov. – М.: Izd. ASV, 2005.

Рекомендована кафедрой строительного материаловедения, специальных технологий и технологических комплексов ИВГПУ. Поступила 18.05.15.