

Экспериментальная проверка ячеечной модели влажпереноса в многослойной пористой среде при укладке слоев материала¹

В.Е. Мизонов¹, В.В. Костарев², В.А. Зайцев², Е.А. Шуина¹

¹ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

² ФГБОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mizonov46@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Тепломассоперенос при отделке тканей является наиболее энергоемкой составляющей всего процесса. Прогнозирование и оптимизация его энергетических параметров для разработки научно обоснованных энергосберегающих мероприятий требует детального изучения влажпереноса – важной составляющей всего процесса. Укладка влажной ткани слой за слоем является типичной технологической операцией в текстильной промышленности. Ранее была разработана нелинейная ячеечная математическая модель этого процесса, которая показала хорошее качественное соответствие физике процесса, но не имела прямой экспериментальной проверки. В связи с этим необходимо проведение такой проверки.

Материалы и методы: В качестве модельного материала использована губчатая салфетка, вырезанные из которой предварительно увлажненные образцы укладывались в пакет слой за слоем и через определенные промежутки времени взвешивались для определения содержания влаги.

Результаты: Предлагаются результаты экспериментальной проверки ячеечной модели влажпереноса в поле массовой силы. Проведено сравнение опытной и расчетной эволюции распределения содержания влаги по слоям.

Выводы: Сравнение опытной и расчетной эволюции распределения содержания влаги по слоям показало их удовлетворительное совпадение. Экспериментальная проверка ячеечной модели влажпереноса в поле массовой силы показала, что она качественно и количественно адекватна реальному процессу и может быть использована в инженерных расчетах оборудования и разработке энергосберегающих мероприятий.

Ключевые слова: конвективный влажперенос, пористый материал, послойная укладка, техника эксперимента, ячеечная модель, распределение содержания влаги.

Experimental validation of the cell model of moisture transfer in multilayer porous medium at stacking of material layers

V.E. Mizonov¹, V.V. Kostarev², V.A. Zaitzev², E.A. Shuina¹

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

² Ivanovo State University of Chemical Technology

E-mail: mizonov46@mail.ru

Abstract

Background: Heat and mass transfer in fabric conditioning is the most energy consuming component of the whole process. Prognosis and optimization of its energy parameters to develop scientifically based energy saving operations requires detailed study of moisture transfer that is an important component of the process. Stacking of humid fabric layer by layer is a typical technological operation in textile industry. Earlier, a non-linear cell mathematical model of the process was carried out. It showed the good qualitative correspondence to the process physics but had no direct experimental validation. In connection with this, such validation is necessary.

Materials and methods: A spongy serviette was used as a model material. The samples cut out of it and filled with moisture were stacked layer by layer and weighted after certain intervals of time to determine the moisture content in them.

Results: The results of experimental validation of the cell model of moisture transfer in the field of mass force are presented. Comparison of experimental and calculated evolution of moisture distribution over the layers is presented.

Conclusions: Comparison of experimental and calculated evolution of moisture distribution showed their reasonable coincidence. Experimental validation of the cell model of moisture transfer in the field of mass force shows that the model is adequate to the real process both qualitatively and quantitatively and can be used in engineering calculation of equipment and working out energy saving operations.

Key words: convection moisture transfer, porous material, layer, layer stacking, experimental technique, cell model, moisture content distribution.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-01684.

Отделка тканей остается самым энергоемким процессом текстильной промышленности, определяющим себестоимость готовой продукции. Важной составной частью тепло-влажностной обработки тканей являются процессы влагопереноса, существенно влияющие на протекание тепловых процессов, а значит, и на общее энергопотребление. Одним из процессов, в которых влагоперенос играет существенную роль, является укладка тканей в многослойные паковки. Наличие массовой силы приводит к перераспределению влаги по слоям ткани, что сказывается на их дальнейшей обработке. В связи с этим актуальной является задача разработки простой, но информативной математической модели этого процесса в целях прогнозирования кинетики распределения влаги в системе с последующей ее оптимизацией.

Несмотря на то, что исследованию процессов влагопереноса в пористых материалах посвящено большое число работ (например, [1–5]), разработанные в них математические модели или слишком просты, чтобы учесть всю специфику протекающих процессов, или слишком сложны, чтобы использоваться в инженерной практике. Среди достаточно новых подходов к моделированию и расчету влагопереноса можно выделить методы, основанные на теории клеточных автоматов [6, 7], и ячеечные модели, о которых речь пойдет ниже.

Ранее [8, 9] нами была построена ячейечная модель влагопереноса в поле массовой силы. Полученные на ее основе результаты численных экспериментов качественно хорошо соответствовали физическому представлению о процессе, но прямой экспериментальной проверки модели не выполнялось. Ниже описана методика экспериментальной проверки ячейечной модели и приведены результаты экспериментов.

Напомним основные положения ячейечной модели влагопереноса в поле постоянной массовой силы, например силы тяжести. Полная ожидаемая высота многослойной паковки разбита на m ячеек идеального перемешивания высотой Δy . Состояние процесса фиксируется через малые промежутки времени Δt , т. е. в дискретные моменты времени $t_k = (k-1) \Delta t$, где номер состояния k может рассматриваться как целочисленный аналог текущего времени. Распределение содержания влаги по всем m ячейкам в k -м состоянии представлено вектор-столбцом $\mathbf{W}^k = \{W_j^k\}$. Процесс развивается следующим образом. При укладке новые слои материала появляются через K_{0j} временных переходов $j = 1, \dots, m$. Эта последовательность может быть представлена вектором $\mathbf{K}_0$. Весь процесс укладки занимает $N = \sum K_{0j}$ временных переходов, причем процесс может продолжаться и после окончания укладки до $n > N$ временных переходов. Моменты появления очередного слоя

определяются как кумулятивная сумма элементов вектора $\mathbf{K}_0$ и представлены вектором $\mathbf{K}$.

Эволюция распределения содержания влаги по ячейкам описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{W}^{k+1} = \mathbf{P}(\mathbf{W}^k + \mathbf{W}_f^k), \quad (1)$$

где $\mathbf{W}_f^k$ – вектор поступления в цепь ячеек влаги, вносимой с вновь появляющимися слоями; $\mathbf{P}$ – матрица конвективной влагопроводности, являющаяся аналогом матрицы переходных вероятностей для цепи Маркова.

Матрица $\mathbf{P}$ является трехдиагональной матрицей размера $m \times m$, элементы которой рассчитываются по формулам:

$$p_{j-1,j}^k = d + v(1 - W_{j-1}^k/W_{\max}), \quad j = 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$p_{j+1,j}^k = de_{j,k}, \quad j = 1, \dots, m-1; \quad (3)$$

$$p_{j,j}^k = 1 - p_{j+1,j}^k - p_{j-1,j}^k, \quad (4)$$

где $d = D\Delta t/\Delta y^2$ (D – коэффициент влагопроводности); $v = V\Delta t/\Delta y$ (V – размерная скорость конвективного переноса); $W_{\max}$ – максимальная масса влаги, которую может вместить ячейка.

В равенстве (2), описывающем переходы влаги в сторону конвективного переноса, множитель в круглых скобках учитывает затрудненность конвективного переноса в ячейки, уже содержащие влагу (если ячейка заполнена влагой полностью, конвективный перенос в нее прекращается). Это делает переходную матрицу зависящей от текущего вектора состояния, т. е. модель становится нелинейной. В равенстве (3), описывающем переходы влаги вверх, множитель $e_{j,k}$ запрещает переходы в ячейки, относящиеся к области, еще не заполненной слоями материала. Этот множитель является элементом матрицы, которая строится по следующему алгоритму. Первоначально создается нулевая матрица размера $m \times n$. Затем в ней размещаются единичные элементы по правилу

$$e_{j,k} = 1, \quad k = K_j + 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m-1. \quad (5)$$

Математическая модель, состоящая из равенств (1)–(5), полностью описывает эволюцию распределения содержания влаги при укладке слоев материала в паковку.

Для экспериментальной проверки модели в качестве модельного материала использовалась бытовая губчатая салфетка «Русалочка» из вязкого волокна (фирмы Spontex SNK, Венгрия), для которой ранее определены параметры влагопереноса: $D = 2,1 \cdot 10^{-3}$ см²/с; $V = 9,9 \cdot 10^{-4}$ см/с [9]. Из губчатой салфетки толщиной 5 мм лазерным ножом вырезались круги диаметром 30 мм. При этом происходило некоторое оплавление боковой поверхности кругов, что благоприятно влияло на отсутствие вытекания влаги через нее. У каждой салфетки контролировалась ее плотность, которая достаточно плотно группировалась около значения

0,1 г/см³. Намоченный погружением в воду материал имел плотность 0,86–0,88 г/см³, т. е. каждый кубический сантиметр удерживал в среднем 0,77 г воды, что являлось предельным содержанием влаги в 1 см³ материала. Для кругового образца предельное содержание влаги составляло $2,7 \pm 0,02$ г. В силу такого малого разброса вес полностью заполненного влагой образца для ускорения укладки контролировался только выборочно.

Для того, чтобы получить всю эволюцию распределения содержания влаги в одном многоступенчатом опыте, использовалась его организация по схеме, показанной на рис. 1.

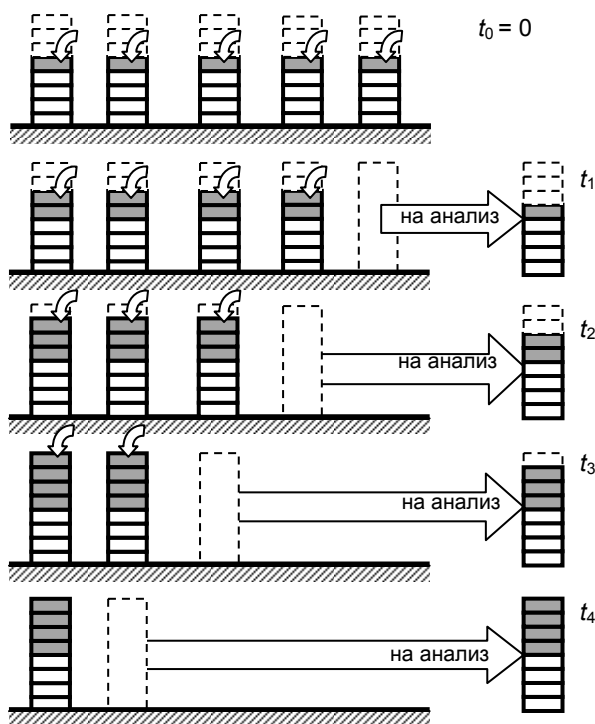


Рис. 1. Принципиальная схема проведения эксперимента

Полный многослойный пакет состоял из восьми слоев. Сначала на подставках с фиксаторами размещалось по четыре слоя сухих образцов. Число пакетов зависело от того, как долго хотели наблюдать процесс после окончания укладки, но составляло не менее пяти. Считалось, что в каждом пакете влагоперенос происходит полностью одинаково.

В начальный момент времени на каждый сухой столбик укладывалось по кружку полностью наполненного влагой материала. Через определенный промежуток времени (он был выбран равным 5 мин) первый столбик разбирался на кружки, которые отправлялись на взвешивание на электронных весах АСОМ JW-1, а на все оставшиеся снова укладывалось по кружку полностью наполненного влагой материала.

Через следующие 5 мин на анализ отправлялся второй столбик, а на оставшиеся

снова укладывались мокрые кружки, и так далее. После укладки последнего восьмого кружка новые кружки не накладывались, а пятый, шестой и т.д. столбики могли служить для исследования эволюции распределения содержания влаги в уже зафиксированном столбике из восьми кружков (слоев).

Каждый такой многоступенчатый опыт повторялся пять раз, чтобы оценить разброс экспериментальных данных.

Экспериментальная и расчетная картина изменения во времени содержания влаги (по отношению к предельному) в каждом из слоев, начиная с нижнего, показана на графиках рис. 2 (их изображение на одном графике очень загромождает его и делает нечитаемым). Расчетные распределения получены по описанной выше модели при указанных выше значениях $D = 2,1 \cdot 10^{-3}$ см²/с; $V = 9,9 \cdot 10^{-4}$ см/с.

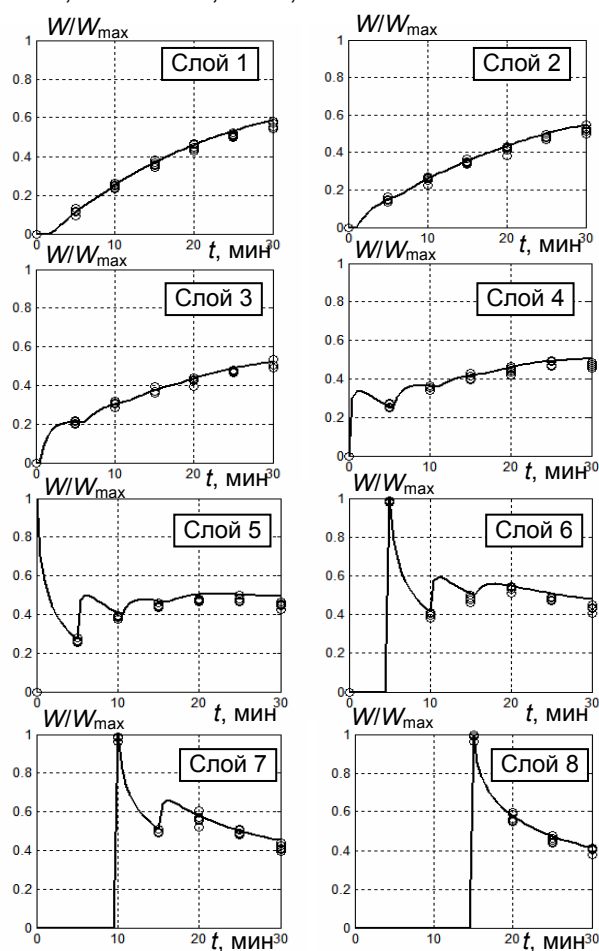


Рис. 2. Изменение содержания влаги по слоям формируемого пакета: точки – эксперимент; линии – расчет

Во всех распределениях наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, чего в принципе можно было ожидать, поскольку параметры переноса взяты из аналогичных опытов с тем же материалом, где также зафиксировано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Некоторое систематическое отклонение вниз на-

блюдается при больших временах процесса, что можно объяснить незначительным контактным сопротивлением влагопереносу в зоне контакта слоев, которое не учитывается в модели.

На рис. 3 показаны на одном графике все расчетные зависимости изменения во времени содержания влаги в слоях. Расчетные точки не показаны, чтобы не загромождать график. Процесс начинается с появления пятого слоя. Примерно через две минуты следы влаги появляются в нижнем слое (ее появление подтверждается экспериментально при времени, равном пяти минутам). С появлением каждого нового слоя формируется временный рост содержания влаги в нижних слоях тем больший, чем ближе этот слой к верхнему.

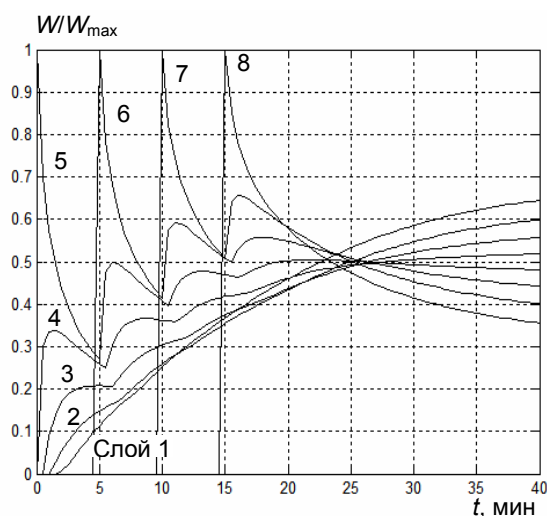


Рис. 3. Расчетное изменение содержания влаги по слоям формируемого пакета

Наконец, на рис. 4 приведен трехмерный график эволюции распределения содержания влаги в условиях эксперимента, который, на наш взгляд, дает более наглядное представление о протекании процесса.

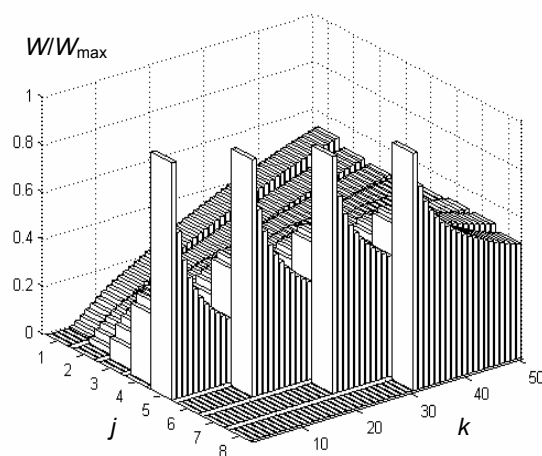


Рис. 4. Эволюция распределения содержания влаги по слоям в условиях эксперимента

Таким образом, экспериментальная проверка нелинейной ячеечной модели влагопереноса в поле однородной массовой силы показала, что эта модель достаточно адекватно описывает процесс, чтобы использоваться в практических инженерных расчетах оборудования для отделки тканей и смежных производств. Кроме того, есть достаточные основания считать, что и при неоднородной (например, центробежной) массовой силе, модель действия которой описана в работе [8], также будет получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997. – 448 с.
2. Луцык Р.В., Малкин Э.С., Абаржи И.И. Тепло-массообмен при обработке текстильных материалов. – Киев: Научная мысль, 1993. – 344 с.
3. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
4. Чешкова А.В. Химические технологии и оборудование трикотажного отделочного производства: учеб. пособие. – Иваново, 2009. – 113 с.
5. Федосов С.В., Кисельников В.П. Конвективная сушка дисперсных материалов в условиях переменной аэродинамической и тепловой обстановки среды // Журнал прикладной химии. – 1984. – Т. 57, № 11. – С. 2502–2507.
6. Бобков С.П. Моделирование основных процессов переноса с использованием клеточных автоматов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52, № 3. – С. 109–114.
7. Бобков С.П., Войтко Ю.В. Использование систем клеточных автоматов для моделирования нелинейных задач теплопроводности // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52, № 11. – С. 126–128.
8. Mizonov V., Zaitsev V., Volynskii V., Leznov V. Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains // Chemical Engineering & Technology. – 2011. – V. 34. – P. 1185–1190.
9. Мизонов В.Е., Костарев В.В., Зайцев В.А. Моделирование влагопереноса в многослойной среде при неравномерной укладке слоев материала // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 76–79.

References

1. Sazhin, B.S., Sazhin, V.B. *Nauchnye osnovy tekhniki sushki* [Scientific basis of dehydration technique]. Moscow, Nauka, 1997. 448 p.
2. Lutsyk, R.V., Malkin, E.S., Abarzhi, I.I. *Teplomas-soobmen pri obrabotke tekstil'nykh materialov* [Heat and mass transfer in fabric conditioning]. Kiev, Nauchnaya mysl', 1993. 344 p.
3. Peregudov, V.V., Rogovoy, M.I. *Teplovye protsessy i ustanovki v tekhnologii stroitel'nykh izdeliy i detaley* [Heat processes and units in construction products and parts technology]. Moscow, Stroyizdat, 1983. 416 p.
4. Cheshkova, A.V. *Khimicheskie tekhnologii i oborudovanie trikotazhnogo otdelochnogo proizvodstva* [Chemical technologies and knitwear finishing equipment]. Ivanovo, 2009. 113 p.
5. Fedosov, S.V., Kisel'nikov, V.P. Konvektivnaya su-shka dispersnykh materialov v usloviyakh peremennoy aerodinamicheskoy i teplovy obstanovki sredy [Convective drying of disperse materials under variable aerodynamic and heat characteristics of the medium]. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1984, vol. 57, no. 11, pp. 2502–2507.
6. Bobkov, S.P. Modelirovanie osnovnykh protsessov perenosa s ispol'zovaniem kletochnykh avtomatov [Modelling of basic transfer processes by using cell automata]. *Izvestiya*

vuzov. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 109–114.

7. Bobkov, S.P., Voytko, Yu.V. Ispol'zovanie sistem kle-tochnykh avtomatov dlya modelirovaniya nelineynykh zadach teploprovodnosti [Using cell automata systems to simulate nonlinear heat conduction problems]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, no. 11, pp. 126–128.

8. Mizonov, V., Zaitsev, V., Volynskii, V., Leznov, V. Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating

Porous Cylinder using Markov Chains. *Chemical Engineering & Technology*, 2011, vol. 34, pp. 1185–1190.

9. Mizonov, V.E., Kostarev, V.V., Zaytsev, V.A. Modelirovanie vlagoperenosa v mnogosloynoy srede pri neravnomernoy ukladke sloev materiala [Modelling of moisture transfer in multi-layer unevenly stacked medium]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 4, pp. 76–79.

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
e-mail: mizonov46@mail.ru

Костарев Валерий Валерьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»
аспирант,
телефон (4932) 30-02-53,
e-mail: lord291189@gmail.com

Зайцев Виктор Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой экономики и финансов,
телефон (4932) 30-02-53,
e-mail: z_victor_a@mail.ru

Шуина Елена Александровна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: barabtseva77@mail.ru