

УДК 621(075.8)

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_4\_168

**ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ  
СУШКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ELECTRO KINETIC CONTROL METHOD  
FOR DRYING TEXTILE MATERIAL**

*В.А. СТЕНИН*

*V.A. STENIN*

(Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова)

(Northern (Arctic) Federal University of M.V. Lomonosov)

E-mail: stenin61@yandex.ru

*Предложен электрокинетический метод исследования нестационарных процессов переноса влаги в текстильных материалах при влажно-тепловой обработке. Проведена апробация метода на экспериментальном стенде при исследовании конвективной сушки (естественная конвекция) текстильного материала. Кривая потенциала протекания аналогична типичной кривой сушки капиллярно-пористого материала, однако на участке периода падающей скорости сушки установлены характерные колебания потенциала протекания. Предложена математическая модель переноса влаги при конвективной сушке, которая объясняет колебания экспериментальной кривой потенциала протекания.*

*An electro kinetic method of research unsteady processes of moisture transfer in textile materials in wet-thermal treatment has been proposed. The method was tested on an experimental stand in the study of convective drying (natural convection) of textile material. The similarity of both leaking potential curve and typical capillary-porous drying curve is found, whereas characteristic fluctuations in the flow potential at the period of the falling drying speed are determined. A mathematical model of moisture transfer at convective drying is proposed, the model explains the vibration of the experimental curve of leakage potential.*

**Ключевые слова:** влажно-тепловая обработка, кривая сушки, электрокинетические явления, потенциал протекания.

**Keywords:** wet-heat treatment, drying curve, electro kinetic phenomena, potential of leakage.

В современной технологии производства волокнистых, тканевых и нетканых материалов, предназначенных для текстильной отрасли промышленности, широко применяется влажно-тепловая обработка (ВТО) [1].

Представляется целесообразным рассмотрение новых подходов и к регистрации и контролю нестационарных процессов переноса влаги в текстильных материалах при ВТО. Рекомендуемый стандартом (ГОСТ Р ИСО 13029-2014) метод определения скорости сушки текстильных материалов в динамическом режиме по изменению величины непроницаемости  $R_{et}$  для паров воды требует специальной измерительной установки, расчетного определения  $R_{et}$ , обеспечения стационарного градиента давления и изотермических условий испытаний, реализация которых возможна лишь в исследовательских или заводских лабораториях. Определенный интерес для процесса ВТО представляет метод определения форм связи влаги с материалом, предложенный М. Ф. Казанским. Основан он на изучении кинетики конвективной изотермической сушки, а графическое дифференцирование кривой сушки позволяет построить кривую скорости сушки. Из других экспрессных методов наиболее совершенным является кондуктометрический метод, физическая сущность которого заключается в зависимости электрического сопротивления капиллярно-пористого тела от его влажности [2]. Однако оба метода, основанные на регистрации влажности исследуемого образца, не позволяют контролировать потоки влаги.

В связи с этим автор предлагает, как возможный, электрокинетический метод исследования нестационарных процессов переноса влаги в текстильных материалах при ВТО. Суть метода состоит в следующем. Если на торцы капилляра, через который проталкивается жидкость, наложить измерительные электроды, то на них появится разность потенциалов (потенциал протекания  $E$ ) [3]. Потенциал протекания вызывается движением зарядов – конвективным (поверхностным) током. Потенциал протекания определяется по формуле [3]:

$$E = k\Delta P = \frac{k}{s}F_4, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, В/Па;  $\Delta P$  – перепад давления на пористой перегородке, Па,  $s$  – площадь сечения капилляров,  $m^2$ ;  $F_4$  – движущая сила, Н.

Текстильные материалы относятся к капиллярно-пористым телам. Известно, что процесс сушки любого капиллярно-пористого материала состоит из перемещения влаги внутри материала и ее испарения с поверхности материала в окружающую среду. Перемещение влаги, обусловленное диффузией, термодиффузией и фильтрацией, вызывается перепадами влагосодержания, температуры и давления по толщине материала, которые в совокупности представляют собой движущую силу  $F_4 = \Delta P_s$  [2].

Математическую модель процесса нестационарного переноса влаги при сушке текстильного материала представим исходя из следующих положений. На влагу в пористой структуре при ее движении в процессе сушки действует ряд сил: сила трения  $F_1$ , сила инерции  $F_3$ , сила давления столба жидкости  $F_2$ , движущая сила  $F_4$ . Алгебраическая сумма всех сил, действующих на поток влаги, в любой момент времени должна быть равна нулю:

$$-F_1 - F_2 - F_3 + F_4 = 0. \quad (2)$$

Сила трения  $F_1$  может быть определена по формуле Пуазейля, где объемный расход  $Q$  равен произведению площади сечения капилляров  $s$  на смещение  $x$  живого сечения потока жидкости [4]:

$$F_1 = \frac{8\eta\ell s}{\pi r^4}Q = \frac{8\eta\ell s^2}{\pi r^4} \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $H \cdot c/m^2$ ;  $\ell$  – длина капиллярной структуры, м;  $s$  – площадь сечения капилляров,  $m^2$ ;  $r$  – радиус капилляров, м;  $Q$  – объемный

расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $x$  – смещение живого сечения потока жидкости,  $\text{м}$ ;  $t$  – время,  $\text{с}$ .

Силу инерции  $F_3$  представим следующей зависимостью [4]:

$$F_3 = \rho l \frac{dQ}{dt} = \rho l s \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность движущейся жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Силу давления столба жидкости (силу тяжести)  $F_2$  определим по формуле [4]:

$$F_2 = \rho g s x. \quad (5)$$

Уравнение движения влаги в пористой структуре в процессе ВТО с учетом зависимостей (1)...(5) запишем в виде:

$$\rho l \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{8\eta l s}{\pi r^4} \frac{dx}{dt} + \rho g x = \frac{1}{k} E. \quad (6)$$

Экспериментальная апробация предложенной математической модели процессов массопереноса при конвективной сушке текстильного материала проводилась на экспериментальном стенде, представленном на рис. 1.

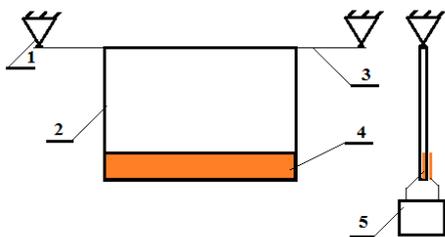


Рис. 1

На натянутую между неподвижными опорами 1 капроновую струну 3 вывешивался опытный образец двухслойного текстильного материала 2 (бязь ГОСТ набивная, артикул 262, плотность  $142\text{г}/\text{м}^2$ , 100% хлопок). Ширина образца 200 мм, высота 120 мм. В нижней части образца внутри слоя и снаружи устанавливались медные сеточные электроды 4. Ширина электрода

30 мм, длина 200 мм. К электродам с помощью медных проводов подключался измерительный комплекс (ИК) 5 (усилитель LM358P, микроконтроллер Arduino Uno Rev 3, персональный компьютер) [5]. Опытный образец предварительно смачивался в проточной воде, отжимался и вывешивался на капроновую струну. Конвективная сушка (естественная конвекция) опытного образца проводилась в течение 280 мин при давлении атмосферного воздуха 764 мм рт. ст. Температура воздуха составляла  $21^\circ\text{C}$  при относительной влажности 41%. В процессе эксперимента регистрировался потенциал протекания ИК5. На рис. 2 (кривая изменения потенциала протекания  $E$ ) представлен уровень изменения  $E$  в процессе сушки опытного образца.

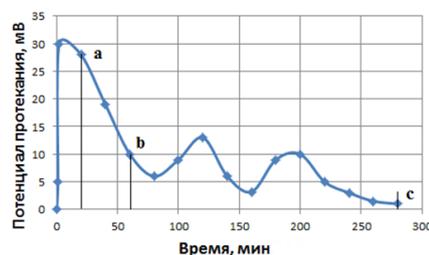


Рис. 2

На графике, как и на стандартной кривой сушки, можно выделить начальную стадию (0a), период постоянной скорости сушки (ab) и период падающей скорости сушки (bc). Однако на участке bc наблюдаются характерные колебания потенциала протекания, что связано с периодическим стеканием влаги из верхней части образца и соответствующей инерционностью движущейся жидкости.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен электрокинетический метод исследования нестационарных процессов переноса влаги в текстильных материалах при ВТО. Проведена апробация метода на экспериментальном стенде при исследовании конвективной сушки (естественная конвекция) текстильного материала. Кривая потенциала протекания аналогична типичной кривой сушки капиллярно-пористого материала, однако на участке периода

падающей скорости сушки установлены характерные колебания потенциала протекания, возникающие в связи с периодическим стеканием влаги из верхней части образца и соответствующей инерционностью движущейся жидкости.

2. Предложена математическая модель нестационарного переноса влаги в текстильных материалах при конвективной сушке, которая объясняет колебательность экспериментальной кривой потенциала протекания и соответственно процесса перемещения влаги в капиллярно-пористом материале при ВТО.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Горелова А.Е., Колотилова Г.В. Влажно-тепловая обработка: общие положения. – Иваново: ИГТА, 2010.

2. Мигальцо И.И., Третьякова Л.И. Термические процессы в швейной промышленности. – Киев: Техника, 1987.

3. Касимзаде М.С. Электрокинетические преобразователи информации. – М.: Энергия, 1973.

4. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003.

5. Блум Д. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства. – СПб: БХВ-Петербург, 2019.

#### R E F E R E N C E S

1. Gorelova A.E., Kolotilova G.V. Vlazhno-тепловая obrabotka: obshchie polozheniya. – Ivanovo: IGTA, 2010.

2. Migal'tso I.I., Tret'yakova L.I. Termicheskie protsessy v shveynoy promyshlennosti. – Kiev: Tekhnika, 1987.

3. Kasimzade M.S. Elektrokineticheskie preobrazovateli informatsii. – M.: Energiya, 1973.

4. Zarubin V.S. Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 2003.

5. Blum D. Izuchaem Arduino: instrumenty i metody tekhnicheskogo volshebstva. – SPb: BKhV-Peterburg, 2019.

Рекомендована кафедрой океанотехники и энергетических установок. Поступила 06.07.21.