

**АППРОКСИМАЦИЯ ИЗОТЕРМ
СОРБЦИИ ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
РАЗЛИЧНЫМИ УРАВНЕНИЯМИ**

**APPROXIMATION OF SORPTION ISOTHERMS
OF COTTON MATERIALS BY DIFFERENT EQUATIONS**

М.К. КОШЕЛЕВА, О.Р. ДОРНЯК, М.С. АПАЛЬКОВА, Т.А. НОВИКОВА

M.K. KOSHELEVA, O.R. DORNYAK, M.S. APALKOVA, T.A. NOVIKOVA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова)

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art),
Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov)

E-mail: oxtpaxt@yandex.ru

Рассмотрены возможности описания сорбционных свойств хлопкового волокна, суровых и мерсеризованных хлопчатобумажных тканей (легких, тяжелых и средней плотности) различными уравнениями. Показано, что для аппроксимации изотерм сорбции хлопкового волокна и хлопчатобумажных тканей целесообразно использовать уравнение Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов.

The possibilities to describe the sorption properties of cotton fiber, harsh and mercerized cotton fabrics (light, heavy and medium density) by different equations were researched. It is shown that for the approximation of the sorption isotherms of cotton fiber and cotton fabrics should be used Tsimermanis' equation for capillary-porous materials.

Ключевые слова: хлопковое волокно, хлопчатобумажные ткани, изотермы сорбции, аппроксимация.

Keywords: cotton fiber, cotton fabrics, sorption isotherms, approximation.

Аналитические выражения изотерм сорбции паров воды текстильными материалами необходимы для формирования и анализа математических моделей процессов тепло- и массопереноса в тканях при их термовлажностной обработке (в отделочном производстве это процессы сушки, крашения, печати, экстрагирования технологических загрязнений из тканей) [1...8].

Рассмотрены возможности описания сорбционных свойств хлопкового волокна и хлопчатобумажных тканей на основе ряда уравнений, часть из которых имеет термодинамическое обоснование (уравнения Корнюхина, Цимерманиса).

Уравнение Гендерсона [1]:

$$u = \left[-\frac{a}{T} \ln(1 - \varphi) \right]^b. \quad (1)$$

Здесь a , b – эмпирические константы.
Уравнение Корнюхина [2]:

$$u = \frac{2\rho\gamma}{v - \sqrt{v^2 - 4\rho\gamma \left(\frac{\zeta}{\rho RT^2} - \ln \varphi \right) \exp \left(-\frac{\alpha}{T} \right)}}. \quad (2)$$

Уравнение Харриса:

$$u = \frac{1}{a + b\phi^c}, \quad (3)$$

где a, b, c – эмпирические константы.

Уравнение Цимерманиса (I) для капиллярно-пористых материалов [3]:

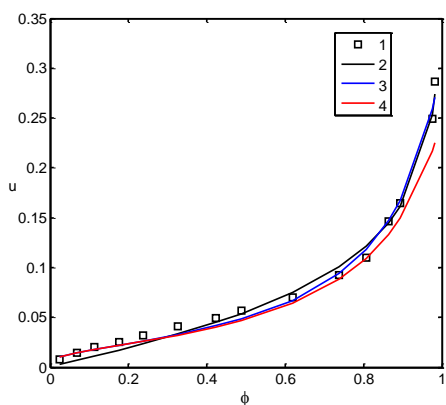
$$u = u_{\text{МГ}} \phi^{a_0 k^{\phi}}, \quad (4)$$

где a_0 и k – безразмерные постоянные, называемые соответственно структурной активностью капиллярно-пористого материала и коэффициентом приращения активности связи; $u_{\text{МГ}}$ – максимальное гигроскопическое влагосодержание.

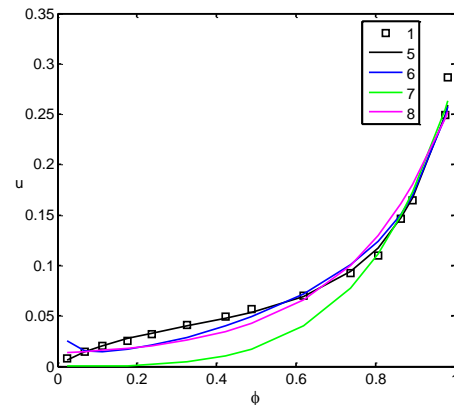
Уравнение Цимерманиса (II) для коллоидных капиллярно-пористых материалов [3]:

$$u = u_{\text{МГ}} \phi^a, \quad a = a_{\text{МГ}} \phi^d, \quad d = d_0 m_a^{\phi}, \quad (5)$$

где $a_{\text{МГ}}$ – максимальная гигроскопическая активность связи при $\phi=1$ и $u = u_{\text{МГ}}$; d_0 – структурная коллоидная активность; m_a – коэффициент приращения коллоидной активности.



а)



б)

Рис. 1

На рис. 1-а, б представлена экспериментальная изотерма сорбции паров воды хлопковым волокном (1) при $t=22,5^{\circ}\text{C}$ и результаты ее аппроксимации: а) с помощью уравнений Гендерсона – 2, Корнюхина – 3, Харриса – 4; б) Цимерманиса (I) – 5, Цимерманиса (II) – 6, Горобцовой – 7, в виде экспоненты – 8.

Уравнение Горобцовой [4]:

$$\left(\frac{u}{u_{\text{МГ}}}\right)^n = \frac{\phi}{\phi + C(1-\phi)} = \frac{1}{1 + C_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \frac{1-\phi^2}{\phi}}. \quad (6)$$

Здесь $C=(u_{0,5}/u_{\text{МГ}})^n-1$; $u_{0,5}$ – влагосодержание материала при $\phi=0,5$; $u_{\text{МГ}}$ – влагосодержание материала при $\phi=1$; n – показатель степени, выражающий толщину слоя поглощенного вещества в молекулах. Как правило, n – целое число, но если на поверхности сорбента имеются участки различной степени активности, тогда n может не быть целым числом. Из уравнения Н.Е. Горобцовой следуют как частные случаи основные виды изотерм: А.В. Лыкова ($n=1$), Б.А. Поснова ($n=1, \phi>0,5$), Фрейндлиха ($C=1$), Ленгмюра ($n=1, C\ll 1$).

Уравнение с экспоненциальной зависимостью:

$$u = a \exp(-b\phi) + c,$$

где a, b, c – эмпирические константы.

Расчеты показали, что наибольшую точность аппроксимации кривой адсорбции водяного пара хлопковым волокном дает модель Цимерманиса (I) для капиллярно-пористых материалов. Найденные значения коэффициентов модели для изучаемых материалов приведены в табл. 1.

Вид материала	Поверхностная плотность ρ , г/м ²	u_{mg}	a	k_0
Хлопковое волокно	1,520	0,3077	0,9648	6,921
Суровые хлопчатобумажные ткани				
молескин	347	0,1413	0,7806	3,342
двунитка	340	0,1478	0,9346	1,797
полудвунитка	280	0,1528	0,8662	3,135
бязь	145	0,1582	0,7258	4,901
сатин	128	0,1314	0,8744	1,963
миткаль	101	0,1718	0,7132	5,726
Мерсеризованные хлопчатобумажные ткани				
спецодежда	482	0,1826	0,7684	4,912
молескин	347	0,1301	0,8322	2,046
двунитка	340	0,1896	0,802	5,064
полудвунитка	280	0,1813	0,7811	4,899
бязь	145	0,1519	0,9815	2,731
сатин	128	0,1332	0,8185	2,19
миткаль	101	0,1224	0,8265	2,038

Согласно расчетам данная модель имеет наименьшую погрешность аппроксимации, по сравнению с остальными рассмотренными уравнениями, и может быть использована

на при определении значения равновесного влагосодержания для широкого круга текстильных материалов во всем диапазоне изменения относительной влажности воздуха.

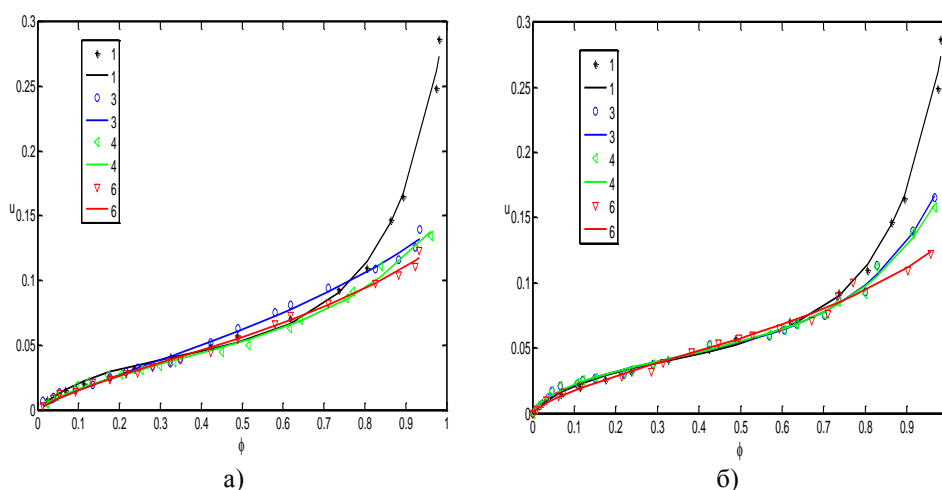


Рис. 2

Экспериментальные изотермы сорбции получены на установке с весами Мак-Бена-Бакра. Графики, представленные на рис. 2, показывают, что модель Цимерманиса (I) может быть использована не только для хлопкового волокна, но также для описания сорбционных зависимостей хлопчатобумажных тканей. На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости равновесного влагосодержания u (кг/кг) от относительной влажности воздуха ϕ для образцов: а) хлопкового волокна – 1; хлопчатобумаж-

ной ткани двунитка суровая, $\rho=340$ г/м² – 3; хлопчатобумажной ткани полудвунитка суровая, $\rho=280$ г/м² – 4; хлопчатобумажной ткани сатин суровый, $\rho=128$ г/м² – 6. Маркером отмечены данные эксперимента, непрерывные кривые – расчетные по формуле Цимерманиса; б) хлопкового волокна – 1; хлопчатобумажной ткани двунитка мерсеризованная, $\rho=340$ г/м² – 3; хлопчатобумажной ткани полудвунитка мерсеризованная, $\rho=280$ г/м² – 4; хлопчатобумажной ткани сатин мерсеризованный, $\rho=128$ г/м² – 6. Маркером от-

мечены данные эксперимента, непрерывные кривые – расчетные по формуле Цимерманиса.

Для удобства анализа на каждом графике показана сорбционная зависимость для хлопкового волокна. Из графиков видно, что в диапазоне изменения ϕ от 0 до $\sim 0,7$ равновесное влагосодержание рассмотренного ассортимента тканей, как суровых, так и мерсеризованных, практически не отличается

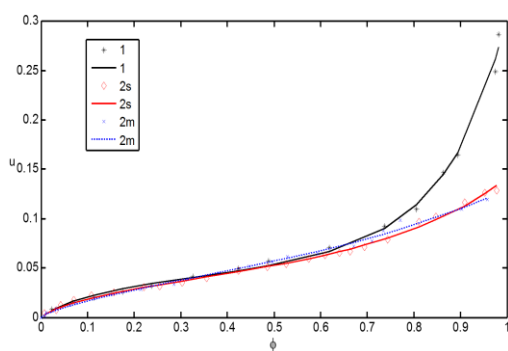
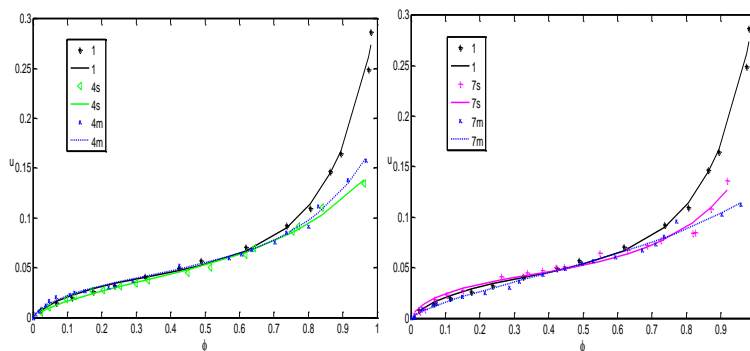


Рис. 3

На рис. 3 (экспериментальные и расчетные зависимости равновесного влагосодержания u (кг/кг) от относительной влажности воздуха ϕ для образцов: хлопкового волокна – 1; хлопчатобумажной ткани молескин суровый, $\rho = 347 \text{ г/м}^2$ – 2s; хлопчатобумажной ткани молескин мерсеризованный, $\rho = 347 \text{ г/м}^2$ – 2m. Значками отмечены данные эксперимента, непрерывные кривые – расчетные по формуле Цимерманиса) и рис. 4 (экспериментальные и расчетные зависимости равновесного влагосодержания u (кг/кг) от относительной влажности воздуха ϕ для образцов: а) хлопкового волокна – 1; хлопчатобумажной ткани полудвунитка суровая, $\rho = 280 \text{ г/м}^2$ – 4s; хлопчатобумажной ткани полудвунитка мерсеризованная, $\rho = 280 \text{ г/м}^2$ – 4m. Значками отмечены данные эксперимента, непрерывные кривые – расчетные по формуле Цимерманиса; б) хлопкового волокна – 1; хлопчатобумажной ткани миткаль суровый, $\rho = 101 \text{ г/м}^2$ – 7s; хлопчатобумажной ткани миткаль мерсеризованный, $\rho = 101 \text{ г/м}^2$ – 7m. Значками отмечены данные эксперимента, непрерывные кривые – расчетные по формуле Цимерманиса) показаны изотермы сорбции для

от равновесного влагосодержания хлопкового волокна. При $\phi > 0,7$ имеет место существенное различие в сорбционных возможностях хлопкового волокна и хлопчатобумажных тканей. Ткани имеют более низкую сорбционную емкость по сравнению с исходным волокном, причем чем ниже плотность ткани (и суровой и мерсеризованной), тем меньше ее максимальное гигроскопическое влагосодержание.



а)

Рис 4

б)

образцов хлопкового волокна и различных видов тканей: высокой плотности – молескин, средней плотности – полудвунитка, низкой плотности (легких) – миткаль, отличающихся только различной предварительной обработкой (ткань суровая и мерсеризованная).

Помимо закономерности, отмеченной выше, графики на рис. 3 и 4 показывают, что влияние обработки (мерсеризация) сказывается на сорбционных свойствах ткани только при высоких значениях относительной влажности воздуха, причем данная тенденция наиболее выражена для образцов с низкой плотностью (миткаль) и практически незаметна для плотных тканей (молескин). Это подтверждает, что основополагающее влияние на сорбционные свойства тканей оказывает исходное волокно [5...7].

В Ы В О Д Ы

1. Изотермы сорбции хлопчатобумажных тканей и хлопкового волокна принадлежат к одному типу. Сорбционные свойства тканей в основном определяются сорбционными

свойствами исходного волокна. Количественный характер изменения равновесного влагосодержания с изменением упругости водяного пара для широкого ассортимента суровых и мерсеризованных тканей практически не отличается от подобной зависимости для их основы – хлопкового волокна при относительной влажности воздуха $\varphi < 0,7$.

2. Уравнение изотермы сорбции Цимерманиса для капиллярно-пористых материалов имеет наилучшую точность аппроксимации для хлопкового волокна и хлопчатобумажных тканей, как суровых, так и мерсеризованных. Данное уравнение целесообразно использовать в расчетах тепло- и массопереноса при термовлажностной обработке тканей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Henderson, S.M.* A Basic Concept of Equilibrium Moisture // *Agr. Eng.* – Vol. 33, 1952. P. 29...33.
2. *Корнюхин И.П. и др.* Уравнения сорбционно-равновесия текстильных материалов в широком диапазоне изменения температуры и влажности воздуха // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2000, №6. С. 84...90
3. *Цимерманис Л.Х.Б.* Сорбция, структурообразование, массоперенос (термодинамика влажного тела). – М.: "Алекс", 2006.
4. *Горобцова Н.Е.* Метод описания и расчета изотерм сорбции-десорбции, общий для различных материалов // *Мат. VI Всесоюз. конф. по теплообмену: Теплообмен-VI / ИТМО им. А.В.Лыкова АН БССР.* – Минск, 1980. С. 60...63.
5. *Косхелева 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.
6. *Kosheleva, M.K., Shchegolev A.A., Reutsky V.A.* Study and Engineering Calculation of the Washing-Off of Knitted Fabrics // *Izv. vuzov. Textile Industry Technology.* – 2004, №6. P.116...118.
7. *Косхелева М.К., Дорняк О.Р.* Анализ сорбционно-структурных характеристик нетканого материала и аппроксимация изотерм сорбции различными уравнениями // *Сб. научн. тр. VI Междунар. научн.-технич. симпозиума: Современные задачи инженерных наук.* – 2017, С. 68...71.

8. *Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Apalkova M.S.* Mathematical model of drying of woven materials // In the book: Innovations in drying: bridging the gap between academia and industry The 6th edition, EuroDrying'2017 will be held in Liege. University of Liege, Free University of Brussels, with the support of the Dutch Working Group on Drying (NWGD). – 2017. С. 117...119.

REFERENCES

1. *Henderson, S.M.* A Basic Concept of Equilibrium Moisture // *Agr. Eng.* – Vol. 33, 1952. P. 29...33.
2. *Kornyukhin I.P. i dr.* Uravneniya sorbtzionnogo ravnovesiya tekstil'nykh materialov v shirokom diapazone izmeneniya temperatury i vlazhnosti vozdukha // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2000, №6. S. 84...90
3. *Tsimermanis L.Kh.B.* Sorbtsiya, strukturoobrazovanie, massoperenos (termodinamika vlazhnogo tela). – М.: "Aleks", 2006.
4. *Gorobtsova N.E.* Metod opisaniya i rascheta izoterm sorbtsii-desorbtsii, obshchiy dlya razlichnykh materialov // *Mat. VI Vsesoyuzn. konf. po teplomassoobmenu: Teplomassoobmen-VI / ITMO im. A.V.Lykova AN BSSR.* – Minsk, 1980. S. 60...63.
5. *Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Novikova T.A.* Issledovanie sorbtzionnykh svoystv khlopchatobumazhnykh tkaney v tekhnologicheskikh operatsiyakh otdelki // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2016, № 3. S. 242...246.
6. *Kosheleva, M.K., Shchegolev A.A., Reutsky V.A.* Study and Engineering Calculation of the Washing-Off of Knitted Fabrics // *Izv. vuzov. Textile Industry Technology.* – 2004, №6. S.116...118.
7. *Kosheleva M.K., Dornyak O.R.* Analiz sorbtzionno-strukturykh kharakteristik netkanogo materiala i approksimatsiya izoterm sorbtsii razlichnymi uravneniyami // *Sb. nauchn. tr. VI Mezhdunar. nauchn.-tekhnich. cimpoziuma: Sovremennyye zadachi inzhenernykh nauk.* – 2017, S. 68...71.
8. *Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Apalkova M.S.* Mathematical model of drying of woven materials // In the book: Innovations in drying: bridging the gap between academia and industry The 6th edition, EuroDrying'2017 will be held in Liege. University of Liege, Free University of Brussels, with the support of the Dutch Working Group on Drying (NWGD). – 2017. S.117...119.

Рекомендована кафедрой промышленной экологии и безопасности РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 05.02.19.