

Ю.О. ВАЩЕНКО, О.О. ГАРАНІНА

Київський національний університет технологій та дизайну

О.В. РОМАНКЕВИЧ

Київський державний інститут декоративно-прикладного мистецтва та дизайну ім. М. Бойчука

КАПІЛЯРНЕ ЗМОЧУВАННЯ ГІДРОФОБНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Для описання капілярності існують традиційні підходи, однак вони не можуть пояснити той експериментальний факт, що процес підняття і розповсюдження рідини спостерігається не тільки в гідрофільних текстильних матеріалах, але й в гідрофобних. В статті проведений аналіз капілярності в текстильних матеріалах, та запропоновано механізм капілярного підняття рідини в гідрофобних текстильних матеріалах, враховуючи їх структурні характеристики.

Ключові слова: капілярні властивості, капіляри в волокнистих матеріалах, крайовий кут змочування.

YU.O. VASHCHENKO, O.O. GARANINA,

Kyiv national university of technologies and design

O.V. ROMANKEVICH

Kyiv state institute of decorative and applied art and design named after M. Boychuk

THE CAPILLARY WETTING OF HYDROPHOBIC FIBROUS MATERIALS

For a description of capillarity are traditional approaches, but they can not explain the experimental fact that the process of raising and distributing the fluid is observed not only in the hydrophilic textile materials, but in the hydrophobic also. The article analyzed the capillarity of textile materials and proposed the mechanism of capillary lifting liquids in hydrophobic textile materials, given their structural characteristics.

Keywords: capillary properties, the capillaries in the fibrous materials, wetting angle.

Вступ

Капілярні властивості текстильних матеріалів мають важливе значення, як в технологічних процесах опоряджувального виробництва, так і при експлуатації. Вони також визначають умови просочування текстильних матеріалів технологічними розчинами при опорядженні та хімічному чищенні. При безпосередньому контакті текстильного матеріалу з крапельно-рідкою вологою вона поглинається шляхом дифузії молекул води в волокноутворюючий полімер. Істотну роль відіграють процеси змочування і капілярного вбирання. Змочування може відбуватися при повному зануренні матеріалу у воду (імерсійне змочування), або при частковому контакті води і матеріалу (контактне змочування). Контактне змочування – це повне або часткове розтікання рідини по поверхні матеріалу. Воно характеризується крайовим кутом, або кутом змочування θ , який виникає між поверхнею матеріалу і дотичної до поверхні межі рідина-повітря (рис.1). Крайовий кут є однією з найважливіших характеристик змочування. Тупий рівноважний крайовий кут ($180^\circ > \theta > 90^\circ$) свідчить про погане змочування, а гострий рівноважний крайовий кут ($90^\circ > \theta > 0^\circ$) вказує на наявність обмеженого змочування. Величина рівноважного крайового кута залежить від поверхневого натягу на межі розділу фаз.

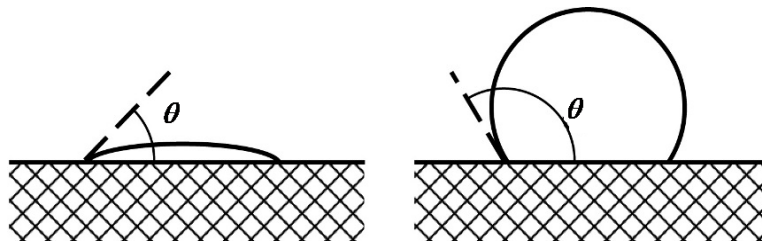


Рис.1. Крайовий кут змочування

Здатність матеріалу до змочування визначається, насамперед, хімічною природою волокон, їх здатністю до сорбції вологи і характером поверхні, її шорсткістю.

Капілярні процеси в текстильних матеріалах фактично являють собою сумарний ефект капілярного проникнення рідини в простір між волокнами і між нитками. Існує велика кількість звивистих, наскрізних та тупікових пор різного розміру в поперечному перерізі та будови, що значно ускладнює описання капілярних процесів в таких системах.

Аналіз останніх досліджень

Капілярне всмоктування зумовлене підйомом рідини по капілярам матеріалу при контакті з його поверхнею. Висота підняття рідини в циліндричному капілярі описується формулою Жюрена [1]:

$$h = \frac{2\sigma}{rg(\rho_l - \rho_v)} \quad (1)$$

де σ - поверхневий натяг рідини;

g - прискорення вільного падіння;
 ρ_l і ρ_v - щільності рідини і пари, відповідно;
 r - радіус меніска рідини.

При сферичній поверхні меніска рідини радіус капіляра $r_k = r \cos \theta$ і формула Жюрена приймає вигляд (при $\rho_l \gg \rho_v$):

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k g \rho_l} \quad (2)$$

Рівняння Жюрена (2), по суті, є тільки якісним обґрунтуванням методу капілярного підняття [2]. Капілярна структура волокнистого матеріалу (тканини, трикотажного та нетканого полотна) утворена капілярами з змінними розмірами і формою в площині поперечного перерізу [1,4,5]. Подальша зміна формули Жюрена, наприклад, з урахуванням того, що пряжа являє собою не окреме елементарне волокно, а пучок елементарних волокон з різними формою поперечного перерізу, ступенем крутки [6-9], не змінює якісно картину: в якості механізму капілярного підняття приймається підйом стовпа рідини по капіляру, один кінець якого занурений у рідину, що змочує.

Постановка завдання

Використовуючи традиційні підходи для описання капілярності важко пояснити той експериментальний факт, що процес підняття і розповсюдження рідини спостерігається не тільки в гідрофільних текстильних матеріалах, але й в гідрофобних. Метою роботи є аналіз капілярності в текстильних матеріалах, виготовлених із гідрофобних волокон з обґрунтованим поясненням цього явища.

Виклад основного матеріалу

Як свідчать дані експерименту, крапля води, нанесена на поверхню трикотажного або нетканого поліпропіленового полотна, не розтікається (рис 2), тобто величина крайового кута змочування краплі на полотні $\theta > 90^\circ$. Величина крайового кута змочування на поверхні полотна (не гладкого) $\theta_{ш}$ описується співвідношенням Венцеля-Дерягина $\cos \theta_{ш} = K \cos \theta$, причому $K > 1$. Для погано змочуваних гладких поверхонь при $\theta > 90^\circ$ грубість, шорсткість поверхні збільшує величину крайового кута змочування $\theta_{ш}$ [4,11-12]. Таким чином, спостережувані в експерименті кути змочування шорсткою поверхні поліпропіленового полотна відповідають гладкій поверхні, для якої крайовий кут також більше 90° (при $K > 1$ знаки величин $\cos \theta_{ш}$ і $\cos \theta$ повинні співпадати).



Рис. 2 Крапля рідини на гідрофобному трикотажному полотні

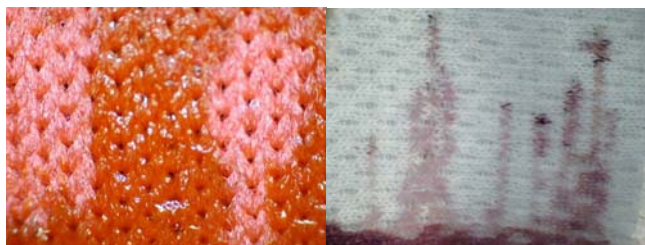


Рис. 3 Капілярне змочування гідрофобних трикотажних полотен

Тим не менш, при зануренні такого полотна одним кінцем у підфарбовану воду, спостерігається капілярне підняття, що показано на рис 3.

Одним із можливих пояснень цього явища може бути те, що існуючі капіляри в волокнистих матеріалах не мають строго циліндричну форму. При змінній товщині капіляра по його довжині в пряжі або полотні в якості моделі можна використовувати капіляр конічної форми з змінною величиною радіуса по довжині (рис. 4) [1].

Переміщення стовпчика рідини в капілярі конічної форми обумовлюється відмінністю в кривизні менісків рідини з двох сторін стовпчика рідини (рис. 4), і, відповідно, розходженням у величині капілярного тиску у двох кінцях стовпчика рідини [1]. При рівності радіусів в циліндровому капілярі стовпчик рідини не буде переміщатися. При вертикальному положенні конічного капіляра переміщення стовпчика рідини буде обмежуватися силою тяжіння. У підсумку капілярне переміщення стовпчика рідини (підняття рідини) в конічному капілярі з радіусами по кінцях r_{k1} і r_{k2} в припущенні сферичної поверхні менісків можна описати в наступній формулі [1]:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_l g} \left(\frac{1}{r_{k1}} - \frac{1}{r_{k2}} \right) \quad \text{або} \quad h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_l g} \left(\frac{r_{k2} - r_{k1}}{r_{k1} r_{k2}} \right) \quad (3)$$

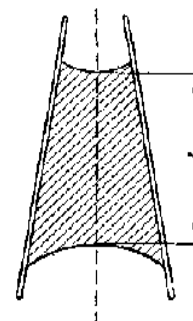


Рис. 4 Рідина, яка змочує, в конічному капілярі [2]

Утворення стовпчика рідини з двома менісками по кінцях можливо, коли рідина потрапляє до капілярів пряжі, полотна не зі сторони торця пряжі або смужки полотна, зануреного в рідину, а з бічної сторони, наприклад, зануреної в рідину смужки полотна за рахунок гідростатичного тиску рідини.

При $\theta < 90^\circ$ і $\cos \theta > 0$, наприклад, для поліамідного полотна висота капілярного підняття $h > 0$ при $r_{k1} < r_{k2}$ (r_{k1} і r_{k2} - радіуси конічного капіляра на кінцях стовпчика рідини), тобто стовпчик рідини буде переміщатися від ділянки капіляра більш широкої до більш вузької ділянки. Таким чином, при $\theta < 90^\circ$ та $\cos \theta > 0$ обидва механізми капілярного підняття працюють як при циліндровому капілярі, так і при конічному у бік збільшення величини $h > 0$:

перший механізм - підйом рідини, коли один з кінців капіляра з постійними поперечними розмірами по довжині капіляра занурений в рідину з утворенням одного меніска (рівняння (2));

другий механізм - можливий підйом стовпчика рідини в капілярі з різними радіусами, від більшої до меншої частини капіляра за наявності двох менісків рідини з різною кривизною (рівняння (3)).

Згідно з формулою Жюрена (рівняння (2)) при $\theta > 90^\circ$ і $\cos \theta < 0$ наприклад, для полотна з ізотактичного поліпропілену, підйом рідини по першому механізму, коли один з кінців капіляра, занурений в рідину з утворенням одного меніска неможливий; як наслідок висота капілярного підняття $h > 0$ можлива лише для конічного капіляра при $r_{k1} > r_{k2}$, тобто стовпчик рідини буде переміщатися від меншої за розмірами в поперечному перерізі частини капіляра до більшої.

При реалізації другого механізму не всі ділянки полотна повинні змочуватися через розподіл капілярів за формою і розмірами (по співвідношенню величин r_{k1} та r_{k2}) в конічних капілярах. Саме це спостерігається експериментально для досліджуваних нами трикотажних полотен, виготовлених із гідрофобних ППР волокон, а також в [13].

На рис 3 показано підняття рідини в смужці вертикально розміщеного поліпропіленового полотна (експеримент по [2]), де видно появу вертикальних смужок забарвленої рідини, що обумовлено наявністю в полотні капілярів різної форми і розмірів. Таким чином, експериментально підтверджено можливість капілярного підняття для полотен з $\theta > 90^\circ$ і $\cos \theta < 0$ по другому механізму: переміщення рідини в капілярах змінного поперечного перерізу від вузьких ділянок капілярів до більш ширших ділянок.

Таким чином нами запропоновано новий механізм капілярного підняття для волокон з величиною крайового кута змочування більше 90° , який експериментально підтверджено на прикладі текстильних полотен із гідрофобних волокон.

При переміщенні рідини в пористих структурах грає роль процес перколяції [14]: перколяційний шлях рідини в полотні можливий за рахунок наявності як поздовжніх, так і поперечних ділянок пряжі (грубокапілярна волога по [1]) в структурі полотна. На рис 3. в якості прикладу наведено трикотажні полотна поперечні і поздовжні ділянки утворюють нитки рядків та стовпчиків, для тканини подібні ділянки утворюють нитки основи та утку.

Експериментально встановлено, що швидкість змочування зростає при наявності перехрещених ділянок пряжі [13]: швидкість змочування зростає, так як на горизонтальних ділянках, на відміну від вертикальних, сила тяжіння не впливає на переміщення стовпчика рідини в капілярі. Важливим фактором при цьому процесі це розмір капілярів оскільки великі капіляри заповнюються рідиною швидше ніж менші, таким чином швидкість змочування є різною на кожній ділянці переплетення.

Висновки

1. Запропоновано механізм капілярного підняття для волокон з величиною крайового кута змочування більше 90°
2. Експериментально підтверджено, що підняття рідини може відбуватись не тільки в гідрофільних але й у гідрофобних текстильних матеріалах.
3. При оцінці капілярного підняття необхідно враховувати внесок перколяційних явищ.

Література

1. Лыков А. В. Теория сушки. – М.: - Энергия, 1968. – 472 с.
2. Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств ДСТУ ГОСТ 3816:2009 (ИСО 811–81)- [Чинний від 2009-12-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – №386, 13 с. – (Національний стандарт України).
3. Стенюгина О.В. Исследование капиллярности хлопчатобумажной пряжи / О.В. Стенюгина, И.Н. Синяева, Ю.П. Гусева // Известия ВУЗ-ов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 8 (329). - С. 14-16.
4. Браславский В.А. Капиллярные процессы в текстильных материалах. – М.: Легпромбытиздат, 1987. - 112с.
5. de Gennes P.-G., Brochard-Wyart F., Quere D. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves. - New York: Springer-Verlag New York, Inc., 2004. – 287 p.
6. Hsieh Y.-L. Wetting Contact Angle Derivations of Cotton Assemblies of Varying Parameters. Textile

Research Journal, 1994. – Vol.64. – N 9. - P. 552 – 553.

7. Rajagopalan, D., A.P. Aneja, and J.M. Marchal, Modeling capillary flow in complex geometries. Textile Research Journal, 2001. 71. – N9. - P. 813 – 831.

8. Wiener J., Dejlóvá P. Wicking and wetting in textiles. - Autex Research Journal. – 2003. - Vol. 3. – No 2. – P. 64 – 71.

9. Liu T., Choi K.-f., Li Y. Wicking in Twisted Yarns. Journal of Colloid and Interface Science, 2008. - Vol. 318: – No 1. P. 134 - 139.

10. Wenzel R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. Ind. Eng. Chem. – 1936. – Vol. 28. – P. 988 – 994.

11. Cassie A. B., Baxter, S. Wettability of porous surfaces. Trans. Faraday Soc. 1944. – Vol. 40. - P.546 – 551.

12. Zisman W. A. Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution// Contact Angle, Wettability, and Adhesion. - Washington, DC: American Chemical Society, 1964. – P. 1–51.

13. Mhetre S. K. Effect of fabric structure on liquid transport, inkjet drop spreading and printing quality. A Thesis Presented to The Academic Faculty. Georgia Institute of Technology. May, 2009. 152 p.

14. 14 Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория приложения алгоритмы. Учебное пособие. – М.: Едиториал УРСС, 2002, - 112 с.

References

1. Lykov A.V, Theory of drying. - Moscow: - Energy, , 1968. – 472 с.
2. Cloths textile. Methods for determination of hygroscopic and water repellency DSTU GOST 3816:2009 (ISO 811-81) - [Effective as of 2009-12-01]. - K.: Derzhspozhivstandart of Ukraine, 2009. - № 386, 13. - (Natsionalny standard of Ukraine).
3. Stenyugina OV Study capillarity cotton / O. Stenyugina, IN Sinjaeva, YP Guseva // Proceedings of Higher Education Institutions. Technology of Textile Industry. - 2010. - № 8 (329). - C. 14-16.
4. Braslavsky VA Capillary processes in textiles. - M.: Legprombytizdat, 1987. - 112с.
5. de Gennes P.-G., Brochard-Wyart F., Quere D. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves. - New York: Springer-Verlag New York, Inc., 2004. – 287 p.
6. Hsieh Y.-L. Wetting Contact Angle Derivations of Cotton Assemblies of Varying Parameters. Textile Research Journal, 1994. – Vol.64. – N 9. - P. 552 – 553.
7. Rajagopalan, D., A.P. Aneja, and J.M. Marchal, Modeling capillary flow in complex geometries. Textile Research Journal, 2001. 71. – N9. - P. 813 – 831.
8. Wiener J., Dejlóvá P. Wicking and wetting in textiles. - Autex Research Journal. – 2003. - Vol. 3. – No 2. – P. 64 – 71.
9. Liu T., Choi K.-f., Li Y. Wicking in Twisted Yarns. Journal of Colloid and Interface Science, 2008. - Vol. 318: – No 1. P. 134 - 139.
10. Wenzel R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. Ind. Eng. Chem. – 1936. – Vol. 28. – P. 988 – 994.
11. Cassie A. B., Baxter, S. Wettability of porous surfaces. Trans. Faraday Soc. 1944. – Vol. 40. - P.546 – 551.
12. Zisman W. A. Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution// Contact Angle, Wettability, and Adhesion. - Washington, DC: American Chemical Society, 1964. – P. 1–51.
13. Mhetre S. K. Effect of fabric structure on liquid transport, inkjet drop spreading and printing quality. A Thesis Presented to The Academic Faculty. Georgia Institute of Technology. May, 2009. 152 p
14. Tarasevich Y.Y. Percolation theory application algorithms. Textbook. - Moscow: Editorial URSS, 2002, - 112 p.

Рецензія/Peer review : 6.3.2014 р. Надрукована/Printed :22.5.2014 р.