

Technická univerzita v Liberci
Fakulta textilní



Vzlínání kapaliny do textilií

Habilitační práce

obor: Textilní technika

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146115272

Ing. Jakub Wiener, Ph.D.
Liberec, 2006

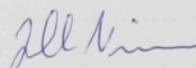
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

U 582 T

365, L P67s.
ob, Lib, 2006

Poděkování

Rád bych poděkoval všem lidem, kteří mi tuto práci umožnili vytvořit.


Ing. Jakub Wiener, Ph.D.

OBSAH

1	Úvod.....	4
2	Seznam přiložených publikací.....	5
3	Komentář k přiloženým publikacím	6
3.1	Měření kontaktního úhlu na plošné textilií	6
3.2	Měření kontaktního úhlu na vláknech	7
3.3	Analýza kontaktního úhlu na plošné textilií	9
3.3.1	Kontaktní úhel na vlákenném povrchu	11
3.3.2	Vliv stavu pórů na smáčivost plošné textilie	13
3.4	Ustálený stav vzlínání do délkové textilie	14
3.4.1	Rozdělení kapaliny v textilií	15
3.4.2	Vzlínání do svislého svazku rovnoběžných vláken	17
3.4.3	Vzlínání do příze	19
3.5	Ustálený stav vzlínání do plošné textilie	20
3.5.1	Vliv sklonu příze ve tkanině	21
3.5.2	Vzlínání kapaliny do mezipřízových prostorů.....	22
3.6	Dynamika vzlínání do textilií.....	26
3.6.1	Exponenciální aproximace Lucas-Washburnova vztahu.....	27
3.6.2	Vliv sklonu příze ve tkanině na dynamiku vzlínání	28
3.6.3	Dynamika vzlínání do struktury plošné textilie	29
4	Závěr - shrnutí přínosů práce	30
5	Seznam publikací autora k tématu	33
6	Použitá literatura	36

1 Úvod

Tato habilitační práce je koncipována jako soubor prací autora s komentářem a teoretickým úvodem. S ohledem na celkovou srozumitelnost a možné využití textu jsem se v komentáři pokusil spojit získané informace v kompaktní celek. Tento přístup logicky vede k určité duplicitě informací v komentáři a přiložených plných textech publikací.

Cílem práce je popis samovolného chování kapaliny v kontaktu s vlákněným útvarem. Největší pozornost je věnována samovolnému pronikání kapaliny do textilního útvaru – vzlínání. V této práci jsem se pokusil shrnout fyzikální aspekty smáčení textilií, které z tohoto zorného úhlu nebyly dosud v textilní literatuře zpracovány.

Samovolné vzlínání kapaliny v textiliích je dosud nedostatečně teoreticky prozkoumáno. Pro analýzu rovnováhy vzlínání do textilií se běžně používají vztahy platné pro kapiláry. Zásadním rozdílem mezi klasickou kapilárou a textilií je v tom, že kapilára je „uzavřený“ a textilie „otevřený“ kapilární systém. Z kapiláry kapalina nevyteče do stran, protože jí v tom brání pevné stěny kapiláry. V textilii vnější pevné stěny nejsou - kapalina je v soustavě držena svým povrchovým napětím mezi vlákny.

V literatuře o vzlínání kapaliny v textiliích není uveden model, který by pracoval s textilním popisem substrátu. Parametry textilií jako zákrut, zaplnění, jemnost vláken, dostava či plošná hmotnost nebyly nikde diskutovány. Autoři většinou pouze relativně srovnávají dosažené výsledky bez ohledu na fyzikální podstatu sledovaných jevů.

Dle mého názoru je podceňována a mylně opomíjena zejména problematika ustáleného stavu vzlínání, s jejíž pomocí lze interpretovat řadu jevů, které ovlivňují z praktického hlediska zajímavější dynamiku procesu. Ustálený stav vzlínání však většina autorů chápe jen jako fyzikální konstantu bez vypovídací hodnoty. Často dochází z neznalosti specifík vzlínání do textilního útvaru (resp. přejímáním teorií z jiných porézních soustav) k zanedbávání důležitých faktorů a výsledky jsou pak zatíženy zbytečnou chybou.

Velkou pozornost si právem zasluhuje i problematika kontaktního úhlu mezi textilií a kapalinou, jehož fyzikální interpretace dosud nebyla pro textilie navržena. Jedná se o důležitý parametr, který ovlivňuje užité vlastnosti textilie a zároveň přímo souvisí s případným vzlínáním kapaliny v textilii.

2 Seznam příložených publikací

Z vlastních původních prací v této oblasti (viz kap. 5) jsem vybral ty, které poskytují celkový přehled o dosažených výsledcích. Pořadí prací jsem zvolil na základě logických souvislostí jednotlivých textů, přestože to neodpovídá důležitosti jednotlivých příspěvků ani jejich datu publikování.

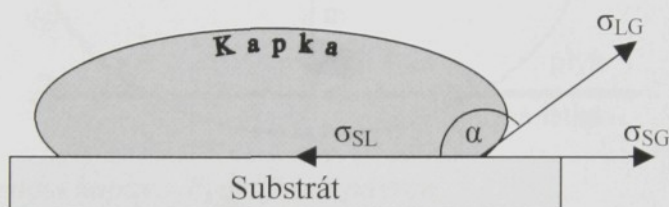
- [Příloha 1]: ODVÁRKA, J., DEMBICKÝ, J., WIENER, J., KOVAČIČ, V.: Water-Repellent Finishing of Textiles, Characteristics of Interfaces and Mechanical Parameters, *Fibres and Textile* 9, 2/2002, s. 58-65
- [Příloha 2]: DEMBICKÝ, J., WIENER, J.: Methoden zur Bestimmung der Kontaktwinkel von Flüssigkeiten beim Kontakt mit Textilfasern, *Melliand Textilberichte*, přijato k publikaci, 2004
- [Příloha 3]: WIENER, J., REVICKÁ, L.: The apparent contact angle on fabric surface, 11. Mezinárodní konference Strutex, prosinec 2004, Liberec, ISBN80-7083-891-4
- [Příloha 4]: WIENER, J., DEMBICKÝ, J.: Smáčení vláknenných povrchů, *Fibres and Textile*, přijato k publikaci
- [Příloha 5]: WIENER, J., DEMBICKÝ, J.: Vliv stavu pórů na smáčivost plošné textilie, *Fibres and Textile*, zasláno do redakce
- [Příloha 6]: WIENER, J.: Vzlínání kapaliny ve svazku vláken, 7. National conference Strutex, TU Liberec, 29. - 30. listopad 2000, s. 69, ISBN 80-7083-442-0
- [Příloha 7]: WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Rovnováha vzlínání kapaliny do nitě (The equilibrium of wicking of liquid into the thread), 9. Conference Strutex, 2. - 3. prosinec 2002, Liberec, ISBN 80-7083-668-7
- [Příloha 8]: WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Wicking and wetting in textiles, *AUTEX Research Journal*, Vol. 3., No. 2., June 2003
- [Příloha 9]: WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Wetting in sloping thread, 10. Conference Strutex, prosinec 2003, Liberec, ISBN 80-7083-769-1
- [Příloha 10]: WIENER, J., BINĚDOVÁ, M., KANG, Z. S.: Capillary Rise in Fabrics, 5th International Conference Textile Science 2003, Technická univerzita v Liberci, 16.-18. červen, 2003, ISBN 80 – 7083-11-X
- [Příloha 11]: WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Capillary Rise in Fabric, 83rd TUWC, Shanghai, May 23-27 2004, Čína, ISBN 1870372611
- [Příloha 12]: WIENER, J.: Dynamics of wicking, *Journal of Dong Hua University*, 3/2002, s.77-79

3 Komentář k přiloženým publikacím

3.1 Měření kontaktního úhlu na plošné textilií

Při sledování povrchů s rovným povrchem lze vycházet z rovnováhy mezipovrchových napětí v rovině substrátu (Youngova rovnice, 1805), která definuje základní smáčecí charakteristiku - kontaktní úhel α na obr. 1. Úhel α je dán rovnováhou mezipovrchových sil (resp. napětí) na kontaktu tří fází (S-pevná látka, L-kapalina, G-vzduch) ve směru povrchu substrátu [1]. Působí zde tři mezipovrchová napětí: mezi kapalinou a pevnou látkou působí napětí σ_{LS} , mezi kapalinou a vzduchem působí napětí σ_{LG} a mezi substrátem (pevnou látkou) a vzduchem působí napětí σ_{SG} .

$$\sigma_{SG} - \sigma_{SL} = \sigma_{LG} \cos(\alpha) \quad (1)$$



Obr. 1: Mezipovrchová napětí působící na rozhraní tří fází

Při měření kontaktních úhlů na hladkém povrchu se využívá mechanického působení kapaliny na testovaný materiál ve formě destičky nebo sledování povrchu kapaliny v okolí testovaného povrchu – optické odečítání kontaktního úhlu. Tyto standardní metody jsou vhodné pouze pro materiály o požadovaných mechanických vlastnostech.

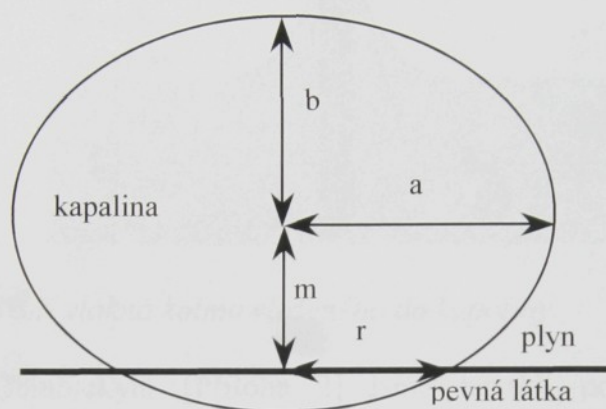
Jednou z variant přímého odečtu kontaktního úhlu je **měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce**. V tomto případě je měřená deska umístěna vodorovně a kapalina je nanášena na ni v podobě drobné kapky – obr. 1. [Příloha 1]

Výpočet kontaktního úhlu je možné založit na tvaru přisedlé kapky. Kapka je jednoduchý tvar, jehož geometrii lze relativně snadno aproximovat. Objem kapky při pokusu je obvykle volen velmi malý - obvykle desítky až stovky mikrolitrů. Čím je kapka menší, tím je její tvar bližší kouli, protože je relativně méně deformován gravitačním polem. Velmi malé kapky (do 50 μ l) lze aproximovat částí koule (kulovým vrchlíkem).[2]

Malé kapka se ovšem dají použít pouze k hodnocení homogenních povrchů, protože na textilií dochází u malých kapek vlivem komplikované geometrie povrchu k jejich deformacím a ke ztrátě osové symetrie.

Proměřením většího množství experimentálně zjištěných průřezů kapek jsem zjistil, že povrchy kapek o objemu v desítkách až stovkách mikrolitrů lze aproximovat přesnějším modelem, který vychází z průniku rotačního elipsoidu s poloprostorem, jehož hraniční plocha protíná elipsoid v kružnici. Tento model budu dále nazývat eliptickým modelem. [Příloha 1]

Eliptický model kapky pracuje s větším množstvím parametrů, než standardní model kulového vrchlíku. Matematický popis kapky je založen na znalosti výšky středu elipsy nad povrchem textilie m , na délce hlavní poloosy a a vedlejší poloosy b elipsy. Tyto parametry jsou vizualizovány na obr.2. [Příloha 1]



Obr. 2: Eliptický model kapky – hydrofobní povrch

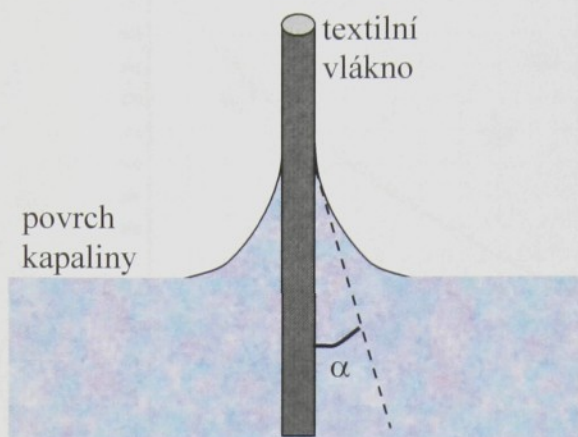
Vyšší počet parametrů eliptického modelu kapky (a, b, m) je plně opodstatněn vyšší přesností modelu a širokými možnostmi, jak tento model aplikovat. Pokud známe parametry a, b, m snadno dopočteme poloměr stykové plochy mezi pevnou a kapalnou fází r a celkový objem kapky. Srovnání změřených a vypočtených hodnot je zpětnou vazbou tohoto modelu - ověřuje, zda byla data získána s dostatečnou přesností a správností. [Příloha 1]

Použití vztahu pro výpočet kontaktních úhlů vycházejícího z eliptického modelu, umožňuje výpočet těchto úhlů pro širší rozsah objemů kapek. Navržený a experimentálně užívaný eliptický model kapky vykazuje menší závislost na objemu kapky než model kulového vrchlíku. Experimentálně bylo zjištěno, že při použití vody jako testační kapaliny se hodnoty takto stanovených kontaktních úhlů téměř nemění v rozsahu 20 až 200 μl . [Příloha 1]

3.2 Měření kontaktního úhlu na vláknech

Měření kontaktního úhlu na vláknech je založeno na stejných fyzikálních principech jako měření kontaktního úhlu na desce, ale rozdíl je v mechanické tuhosti měřeného objektu a v délce kontaktu materiálu s kapalinou. Vlákna jsou typická svým malým průměrem a tedy i malou silou, kterou jediné vlákno působí na povrch kapaliny ve svém okolí. Deformace povrchu kapaliny jsou proto jen malého měřítka a proto se obtížně detekují a kvantifikují. Tuhost vláken je tak malá, že většinu metod použitelných pro materiál ve formě desky nelze na vlákna aplikovat, protože by docházelo k mechanické deformaci vláken a zároveň kruhový průřez vlákna ztěžuje analýzu výsledků.

Pro měření běžných textilních vláken se v literatuře uvádí pouze přímé měření kontaktního úhlu mezi vláknem a kapalinou – obr. 3. I za použití kvalitního vybavení je nutné používat vlákna spíše většího průměru. Vlákná s průměrem nižším než 10 μm jsou již příliš tenká – kontaktní úhly nelze odečíst s takovou přesností, aby následná analýza vedla k použitelným výsledkům.



Obr. 3: Meniskus v okolí vlákna kolmo vloženého do kapaliny

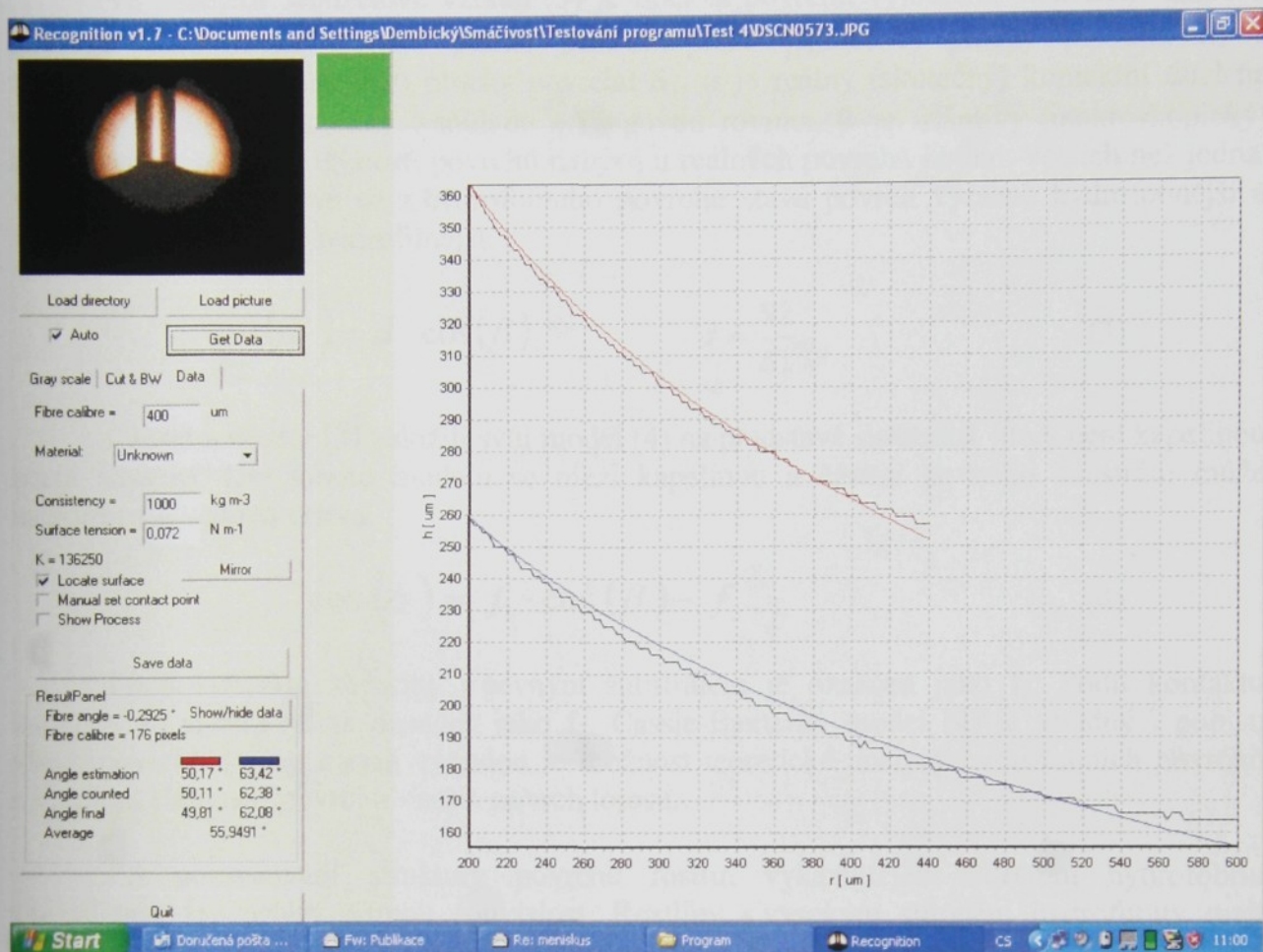
Společně s Dembickým [Příloha 2] jsme navrhli nový postup vyhodnocování kontaktních úhlů z povrchu menisku, který vznikne při kontaktu svislého vlákna s povrchem kapaliny. Principem nově navrženého řešení je matematicko - fyzikální analýza celého průběhu menisku, pomocí níž je vypočten kontaktní úhel mezi vláknem a povrchem kapaliny.

Tvar menisku lze vypočítat numericky na základě postupu, založeného na změnách křivosti povrchu v závislosti na vnitřním tlaku (Laplaceova rovnice) a hydrostatickém tlaku. Po zavedení cylindrických souřadnic a matematických úpravách získáme konečnou rovnici menisku ve tvaru (2), kde H je výška menisku jako funkce vzdálenosti od osy vlákna r , H' je první a H'' druhá derivace výšky menisku podle vzdálenosti od osy soustavy, gravitační konstanty g , hustota kapaliny je označena ρ a její povrchové napětí σ_{LG} .

$$\frac{H''}{(1 + H'^2)^{3/2}} + \frac{H'}{r \cdot \sqrt{1 + H'^2}} = \frac{\rho \cdot g}{\sigma_{LG}} \cdot H \quad (2)$$

Celý průběh vypočteného menisku lze kontrolovat porovnáním hmotnosti kapaliny v menisku a síly působící na rozhraní vlákno-kapalina. Získané hodnoty jsou v ideálním případě ve vzájemném souladu, hmotnost veškeré kapaliny v menisku odpovídala mezipovrchové síle, která meniskus vytváří. [Příloha 2]

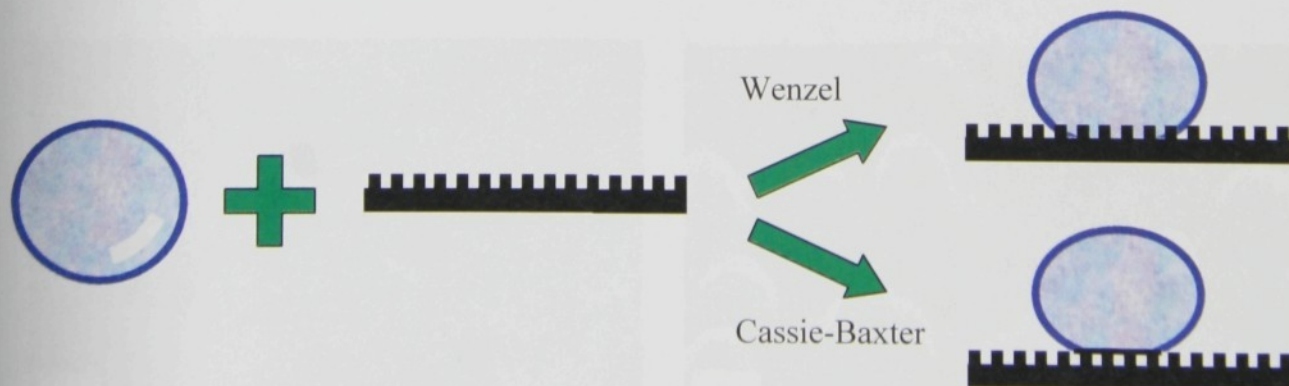
Získanou rovnici (2) jsme implementovali do programu, který je schopen analyzovat meniskus kapaliny. Program v mikroskopickém snímku identifikuje vlákno a povrch kapaliny, kterým proloží optimální teoretický průběh menisku. Výsledkem výpočtu je kontaktní úhel mezi vláknem a kapalinou.



Obr. 4: Ukázka reálné analýzy menisku

3.3 Analýza kontaktního úhlu na plošné textilií

Při kontaktu kapaliny s členitým povrchem je dán výsledný kontaktní úhel mezi kapalinou vzduchem a pevným povrchem dán strukturou povrchu pevné látky, jde o zdánlivý kontaktní úhel. Existují dva základní modely smáčivosti členitých povrchů: Wenzelův a Cassie-Baxterův. Žádný z těchto modelů nebyl dosud úspěšně aplikován v analýze kontaktních úhlů mezi kapalinou a textilií.



Obr. 5: Chování kapky na členitém povrchu – schematický rozdíl mezi Wenzelovým a Cassie-Baxterovým modelem smáčivosti

Ve známém Wenzelově vztahu (3) je drsnost povrchu vyjádřena faktorem drsnosti povrchu d definovaným jako poměr mikroskopické (skutečné) plochy povrchu S_2 a makroskopické (geometrické) plochy povrchu S_1 . α je reálný (skutečný) kontaktní úhel na hladkém materiálu ustavený v souladu s Yangovou rovnicí. β je zdánlivý (makroskopický) kontaktní úhel. Faktor drsnosti povrchu nabývá u reálných povrchů hodnot větších než jedna. Vlivem nárůstu drsnosti se z hydrofobního povrchu stává povrch výrazně hydrofobnější a z hydrofilního výrazně hydrofilnější.

$$\cos(\alpha) = d \cdot \cos(\beta) \quad d = \frac{S_2}{S_1} \quad (3)$$

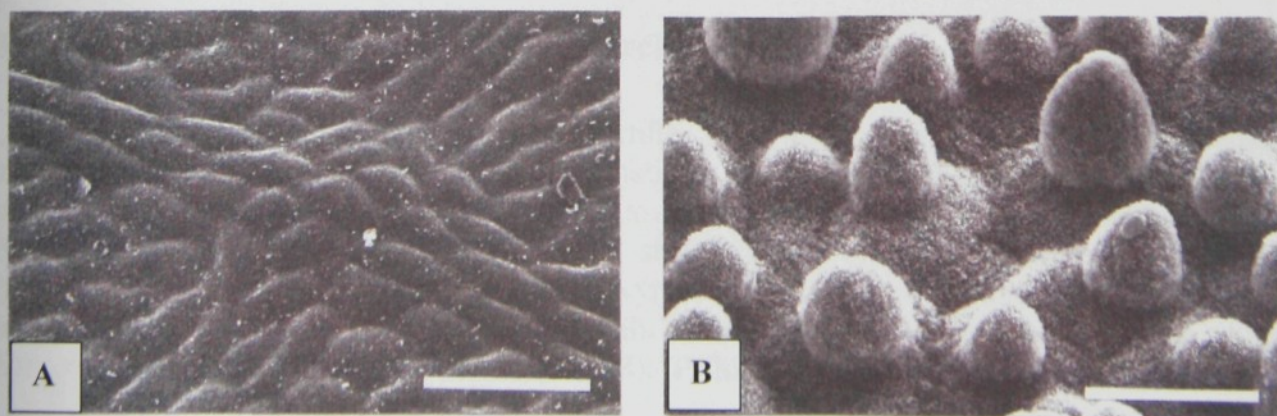
Cassie a Baxter [3] založili svůj model (4) na představě substrátu, který není kapalinou zcela smočen. Dle tohoto modelu se mezi kapalinou a částmi pevného substrátu může nacházet vzduchová vrstva.

$$\cos(\alpha) = f_1 \cdot \cos(\beta) - f_2 \quad (4)$$

Podíl kontaktu kapaliny s pevným substrátem je označen jako f_1 . Podíl kontaktu kapaliny se vzduchem je označen jako f_2 . Cassie-Baxterův model (4) je vhodný k popisu všech povrchů a jeho hlavní výhodou je možnost teoretické analýzy hydrofobních povrchů s vysokou členitostí povrchu - např. povrch lotosu.

Při porovnávání struktury povrchů rostlin vykazujících extrémní hydrofobitu s textiliemi, lze nalézt přímou souvislost. Rostliny s vysokým stupněm hydrofobity mají členitý povrch, ve kterém lze identifikovat více úrovní členitosti – povrch je členitý v každém zvětšení. Jsou zde téměř makroskopické útvary o velikostech v desítkách až stovkách mikrometrů, ale i mikrostruktury o rozměrech v desetínách mikrometru. Tímto způsobem rostliny dosáhnou vysoké nesmáčivosti povrchu.

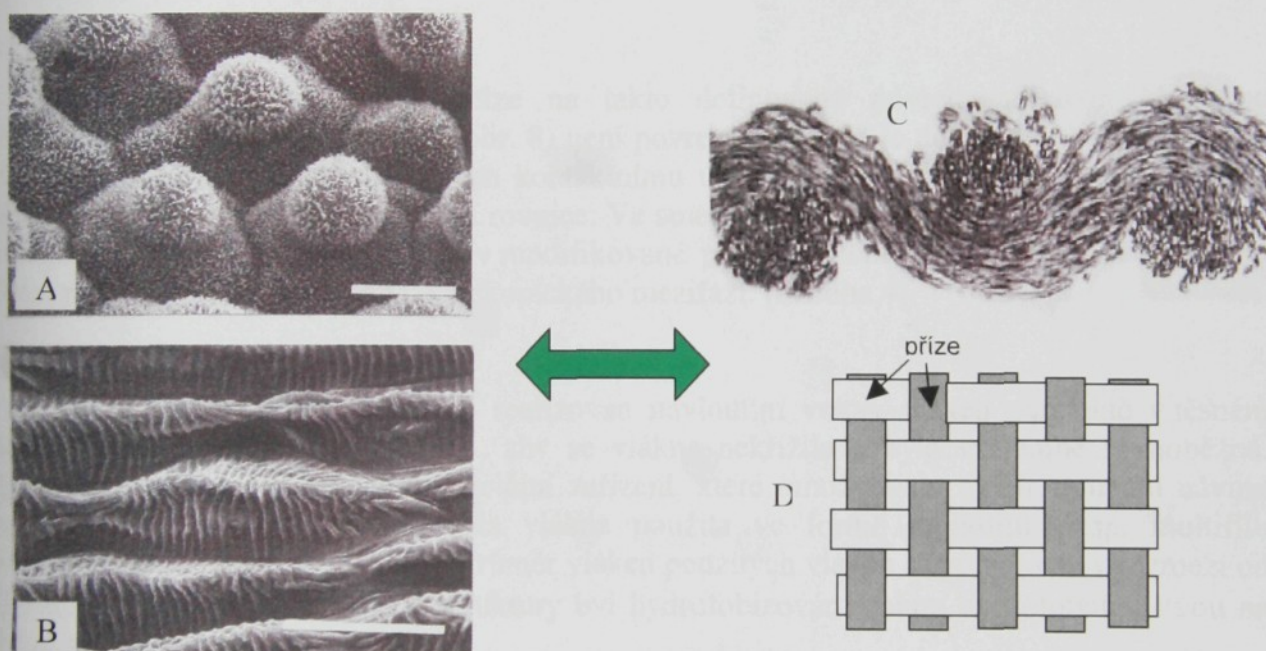
Na obr. 6A je snímek z elektronového mikroskopu, relativně hladného povrchu (list buku, *Fagus sylvatica*), na kterém voda vytváří kontaktní úhel 72° . Na Obr. 6B (*Nelumbo lucifera*), obr. 7A (*Colocasia esculenta*) a obr. 7B (*Mutisia decurrens*) jsou snímky členitých povrchů, na kterých voda vytváří kontaktní úhel okolo 160° . Rozdíly v těchto kontaktních úhlech jsou pozoruhodné zejména s ohledem na prakticky shodné chemické složení všech těchto rostlinných povrchů.



Obr. 6: Vliv drsnosti povrchu na kontaktní úhel – povrch rostliny/voda, délka měřítka je $20\mu\text{m}$

Také u textilií lze nalézt několik úrovní členitosti v rozměrech od stovek až po jednotky mikrometrů (vazba tkaniny, příze, vlákna, nerovnosti na vláknech). Viz obr. 7 C (řez běžnou tkaninou z bavlněných vláken) a obr. 7D (schéma struktury tkaniny tvořené z přízí). Na tomto základě je založen odperlující efekt (hydrofobní úprava textilií), kde můžeme dosáhnout kontaktních úhlů na úrovni 150° . I přes vyšší porozitu textilií nejsou tedy běžně dosahované kontaktní úhly na textiliích stejně vysoké, jako na některých rostlinách. Základním důvodem je zmíněný rozdíl v rozměru povrchových útvarů (na textiliích jsou řádově větší než na rostlinách) a s tím související vyšší nestejnoměrnost povrchu u textilií. [Příloha 3]

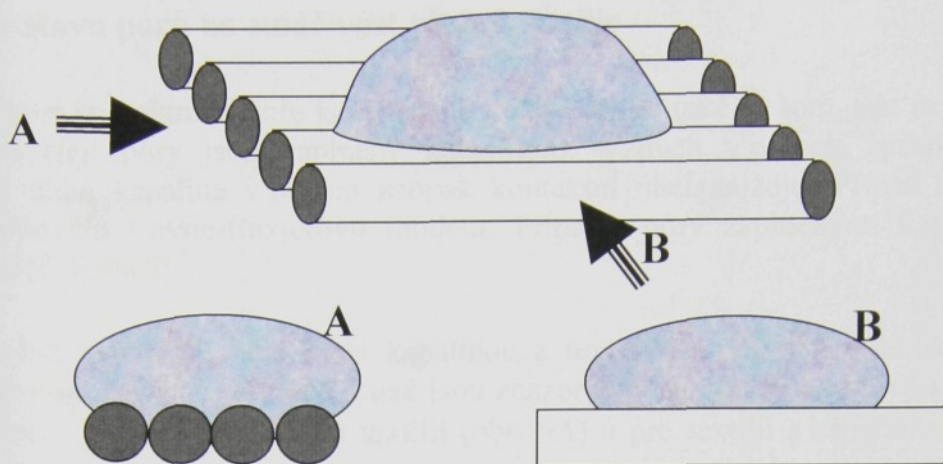
Problém kontaktního úhlu mezi kapalinou a tkaninou jsem, v souladu s fyzikálním základem problému, rozdělil teoreticky na dva dílčí jevy: **kontaktní úhel na vlákenném povrchu** a **vliv stavu pórů na kontaktní úhel**.



Obr. 7: Srovnání struktury přírodních vysoce hydrofobních povrchů se strukturou bavlněné tkaniny, délka měřítka (A, B) je $20\mu\text{m}$

3.3.1 Kontaktní úhel na vlákenném povrchu

Jako jisté zjednodušení (model) textilie jsem navrhl povrch tvořený paralelně uspořádanými vlákny. Tato struktura je matematicky lépe definovatelná a analyzovatelná než běžná tkanina, ale stále zde platí stejné zákonitosti – struktura je definovaně uspořádaná a je tvořena textilními vlákny. Vzniklá modelová struktura má výraznou anizotropii, která je zřejmá z obr. 8. Projevem této anizotropie je výrazná odlišnost kontaktního úhlu v závislosti na směru pozorování, maximálního rozdílu získáme porovnáním kontaktních úhlů pozorovaných ve směru A a ve směru B (Obr. 8). [Příloha 4]



Obr. 8: Schematické znázornění anizotropního povrchu tvořeného paralelními vlákny v těsném kontaktu

V důsledku anizotropie nelze na takto definovaný povrch aplikovat klasickou Wenzelovu rovnici. Ve směru A (obr. 8) není povrch drsný, ale je dokonale hladký. Proto je v tomto směru kontaktní úhel roven kontaktnímu úhlu na hladkém povrchu. Pro kontaktní úhel v tomto směru platí Youngova rovnice. Ve směru B (obr. 8) je povrch drsný a lze na něj aplikovat Wenzelovu rovnici, ale v modifikované podobě, která definuje drsnost ve směru jako poměr délek reálného a makroskopického mezifází. [Příloha 4]

Experimentálně byl povrch realizován navinutím vrstvy vláken paralelně v těsném kontaktu na pevnou podložku tak, aby se vlákna nekřížila a byla vzájemně rovnoběžná. K navíjení vrstvy bylo použito speciální zařízení, které umožňovalo měnit stoupání náviny vláken. Z praktických důvodů byla vlákna použita ve formě monofilu (resp. multifilu v případě velmi jemných vláken). Průměr vláken použitých vláken se pohyboval v rozmezí od 10 do 500 μm . Povrch vzniklé struktury byl hydrofobizován tenkou hydrofobní vrstvou na bázi perflouralkanu. [Příloha 4]

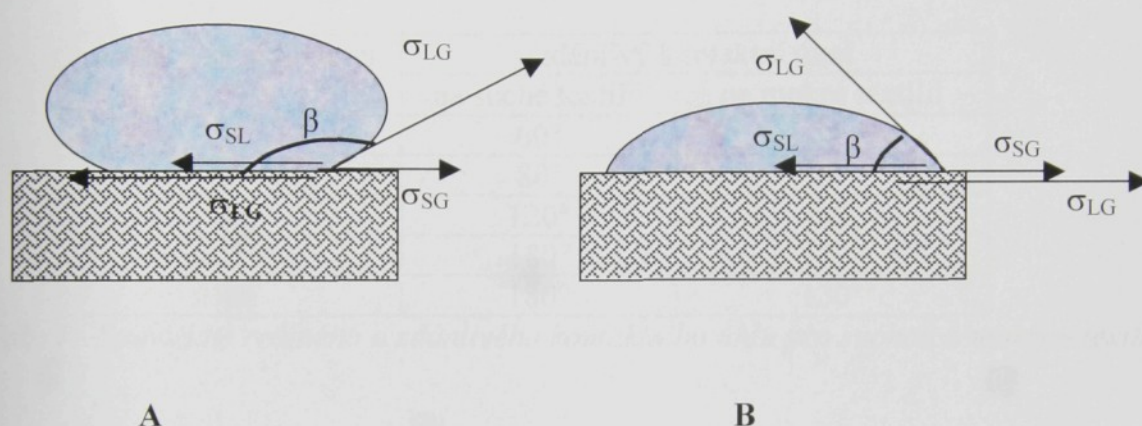
Na základě teoretické analýzy geometrie experimentu (obr. 8) dosahuje při těsném kontaktu vláken zdánlivý kontaktní úhel ve směru pozorování A hodnoty až 150° pro případ, že reálný kontaktní úhel je 90° a přisedlá kapka je alespoň řádově většího rozměru než průměr vláken. Na základě analýzy zdánlivého kontaktního úhlu ve směru pozorování B roven 90° , pokud je reálný kontaktní úhel 90° . V obou směrech pozorování s rostoucí vzdáleností sousedních vláken roste i hodnota zdánlivého kontaktního úhlu – teoreticky až k 180° . [Příloha 4]

Experimentálně byl ve směru A stanoven kontaktní úhel 140° a ve směru B úhel 110° . Odchytky experimentu od teorie byly zapříčiněny nedodržením těsného kontaktu sousedních vláken – problémy přinášela zejména manipulace s vlákny o vyšší tuhosti. [Příloha 4]

3.3.2 Vliv stavu pórů na smáčivost plošné textilie

Velikost kontaktního úhlu kapaliny na textilií závisí také na tom, zda je textilie suchá nebo mokrá (její póry jsou zaplněny kapalinou). Vzduch v pórech způsobuje zvýšení kontaktního úhlu, kapalina v pórech naopak kontaktní úhel snižuje. Příklad suchých pórů v textilií odpovídá Cassie-Baxterovu modelu. Příklad s póry zaplněnými kapalinou nebyl dosud řešen. [Příloha 5]

Zdánlivý kontaktní úhel mezi kapalinou a textilií je ovlivněn orientací a velikostí mezipovrchových napětí v soustavě, které jsou znázorněny na obr. 9. Zdánlivý kontaktní úhel β je znázorněn pro případ suchou textilií (obr. 9A) a pro textilií s kapalinou mezi vlákny (obr. 9B).



Obr. 9: Kontakt textilie s kapalinou – detail rozkreslení mezi-povrchových napětí působících v povrchu suché (A) a mokré (B) textilie

Na základě teoretické analýzy situace na obr. 9 lze vyjádřit vztah mezi zdánlivým kontaktním úhlem β a skutečným kontaktním úhlem α jejich vzájemný vztah (5) respektive (6), které jsou založeny na znalosti délky makroskopického kontaktu kapaliny, vzduchu a textilie L a na znalosti skutečné délky tohoto rozhraní L_R , které lze rozdělit na část v kontaktu s vlákny L_V a z části v kontaktu s mezivláknennými póry L_P . Pro případ textilie, jejíž póry jsou zaplněné kapalinou platí rovnice (5). Obdobně lze dospět k vztahu (6) mezi zdánlivým a skutečným kontaktním úhlem pro suchou textilií.

$$\frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} = \frac{L_P \cdot \sigma_{LG} + L_V \cdot \sigma_{SG} - L_V \cdot \sigma_{SL}}{L \cdot \sigma_{SG} - L \cdot \sigma_{SL}} \quad (5)$$

$$\frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} = \frac{-L_P \cdot \sigma_{LG} + L_V \cdot \sigma_{SG} - L_V \cdot \sigma_{SL}}{L \cdot \sigma_{SG} - L \cdot \sigma_{SL}} \quad (6)$$

Rovnice (6) a (7) lze vyjádřit i ve tvaru Cassie-Baxterova modelu:

$$\cos(\alpha) = f_1 \cdot \cos(\beta) \pm f_2 \quad (7)$$

V tomto tvaru je patrný rozdíl mezi klasickou formulací Cassie-Baxterova modelu (4) a rovnicí (7), která je obecnější a řeší i kontaktní úhly na porézních substrátech, jejichž póry jsou zaplněné kapalinou. [Příloha 5]

Výpočet reálných hodnot L_P a L_V by byl značně komplikovaný a použitelný pouze pro jediný případ, protože by musel vycházet z chování kapaliny na konkrétní textilií. Musel by zahrnovat geometrii a deformovatelnost textilní struktury.

Jako ukázkou vlivu stavu mezivláknenných prostor na kontaktní úhel jsem provedl výpočet zdánlivého kontaktního úhlu pro suchou a mokrou tkaninu na virtuální textilií, pro kterou platily tyto hodnoty: $L_P=L/2$ a $L_V=L$. Takto získané výsledky (tab. 1) jsou v principiálním souhlasu s pokusy na reálných tkaninách. [Příloha 5]

reálný kontaktní úhel	zdánlivý kontaktní úhel	
	na suché textilií	na mokré textilií
0°	60°	0°
45°	80°	0°
90°	120°	60°
135°	180°	100°
180°	180°	130°

Tab. 1: Souvislost reálného a zdánlivého kontaktního úhlu pro suchou a mokrou textilií

Na reálných textiliích je situace komplikována různými stupni smočení textilie. V typickém případě je na počátku pokusu textilie suchá a na konci pokusu saturována kapalinou. S různým množstvím kapaliny v textilií se mění i délky mezifází mezi přisedlou kapkou a textilií. [Příloha 5]

3.4 Ustálený stav vzlínání do délkové textilie

Transport kapaliny do vláknenného svazku, příze nebo tkaniny může být zapříčiněn vnějšími silami nebo kapilárními silami. Při spontánním transportu kapaliny do porézní soustavy kapilárními silami hovoříme o vzlínáním. Vzlinání nastane, jestliže se textilie dostane do kontaktu se smáčivou kapalinou, např. v podobě kapky nanesené na textilií. Samovolné smáčení je předpokladem pro samovolné vzlínání. [Příloha 6,7,8]

V literatuře je teoreticky řešen pouze základní model: Kapalína, která se dostane do kontaktu se smáčivou kapilárou, do ní samovolně proniká, dokud se neustaví rovnováha. V nekonečném čase kapalína vyvzlíná do rovnovážné sací výšky, která je dána rovnováhou mezi **silou gravitační** a **silou vzlínání**, která je dána součtem mezipovrchových sil na rozhraní kapalína-plyn-pevná látka. Při vzlínání se ustálí povrch kapaliny v takové poloze, aby vzniklý útvar byl energeticky nejvýhodnější (minimální styčná plocha kapaliny se vzduchem, maximální se smáčivým povrchem, minimální výška těžiště útvaru ...). [Příloha 6,7,8]

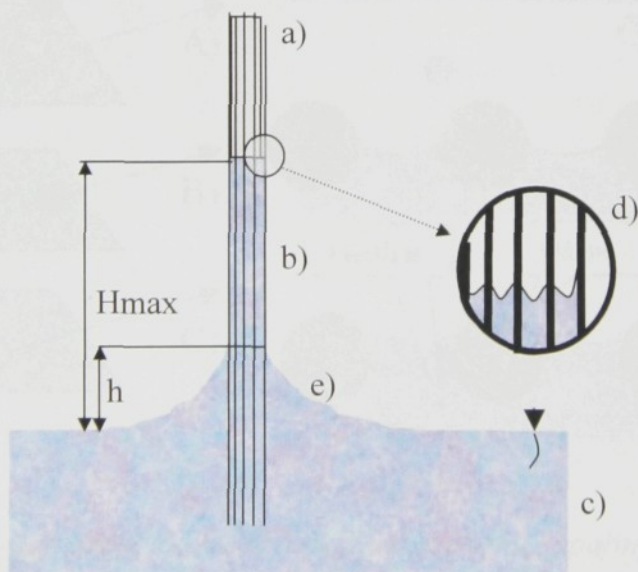
Vzlínání kapaliny do porézní struktury, například plošné textilie, se řídí principiálně stejnými principy jako vzlínání do válcové kapiláry. Kapalina, která do porézní struktury pronikla, má však komplikovaný tvar a povrch, proto je analýza vzlínání v této soustavě mnohem komplikovanější. [Příloha 6,7,8]

Nejjednodušším textilním útvarem, ve kterém může nastat vzlínání kapaliny, je svazek rovnoběžných vláken. Tento útvar v základní podobě je tvořen rovnoběžnými nekonečnými vlákny kruhového průřezu, není zakroucen, má konstantní zaplnění a je ideálně stejnoměrný. [Příloha 6,7,8]

3.4.1 Rozdělení kapaliny v textilií

Při vzlínání kapaliny do svislého svazku vláken (případně do komplikovanějšího textilního útvaru), který je na spodním konci vnořen do kapaliny (obr. 10c), zaujme kapalina tvar zakreslený na následujícím obr. 10 – část vláknenného útvaru zůstane nesmočena (obr. 10a), část je zaplněna kapalinou (obr. 10b).

Vzniklý kapalinový útvar lze formálně rozdělit na tři principiálně odlišné elementární části: **Svrchní část** na nejvyšším místě kapalinového útvaru (10d) se nachází v maximální výšce H_{MAX} nad volnou hladinou kapaliny. Smočená vlákna tvoří hlavní **válcovou část** (obr. 10b), jejíž svislý povrch je tvořen částečně vlákny a částečně povrchem kapaliny. Na rozhraní mezi válcovou částí a nezakřivenou hladinou kapaliny se vytvoří **přechodová část** (obr. 10e). [Příloha 6,7,8]



Obr. 10: Obecný případ vzlínání kapaliny do svislé textilie

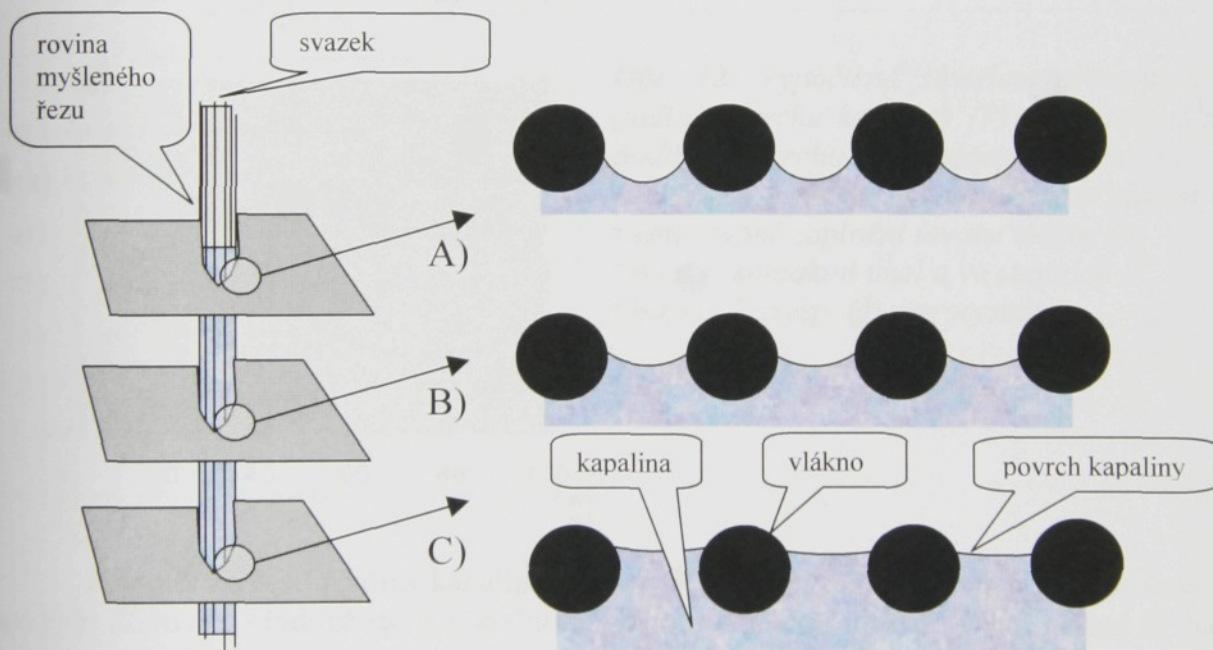
V závislosti na počtu vláken v útvaru, na zaplnění, na smáčivosti vláken kapalinou atd. se jednotlivé části kapalinového útvaru (obr. 10) podílejí na vzlínání v různé míře. V případě běžných textilií vzlínání významně ovlivňuje pouze válcová část kapalinového útvaru.

3.4.1.1 Válcová část kapalinového útvaru

Kapalina vyplňuje mezivláknenné prostory a vytváří útvar s minimální energií. Těmto podmínkám odpovídá válec, ve kterém jsou obsažena smočená vlákna. Povrch válce tvoří kapalina a částečně nesmočená vlákna. [Příloha 6,7,8]

Výpočet tvaru povrchu kapaliny v hlavní části kapalinového útvaru je komplikovaný. Nejprve je nutné vypočítat křivost povrchu v dané výšce nad volnou hladinou kapaliny. Pro výpočet křivosti lze použít Laplaceovu rovnici, uvažující jen jeden poloměr křivosti, protože v tomto případě je křivost ve směru osy svazku zanedbatelná.

Na obr. 11 je zakreslena křivost povrchu kapaliny v několika myšlených řezech, které se liší výškou nad nezakřivenou hladinou kapaliny. Nejvýše je proveden myšlený řez A), kde je prostor mezi vlákny v povrchu svazku zaplněn jen malým objemem kapaliny o vysoké křivosti povrchu. To je v přímé souvislosti s vysokou hodnotou podtlaku v kapalině v místě tohoto řezu. Nejnižší (těsně nad nezakřivenou hladinou kapaliny) je proveden řez C), kde je patrný velký objem kapaliny mezi vlákny v povrchu svazku a nízká křivost povrchu kapaliny – to je dáno zanedbatelným podtlakem v tomto místě kapaliny.

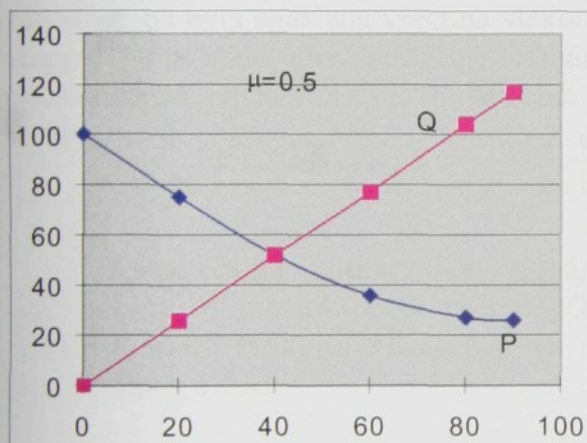
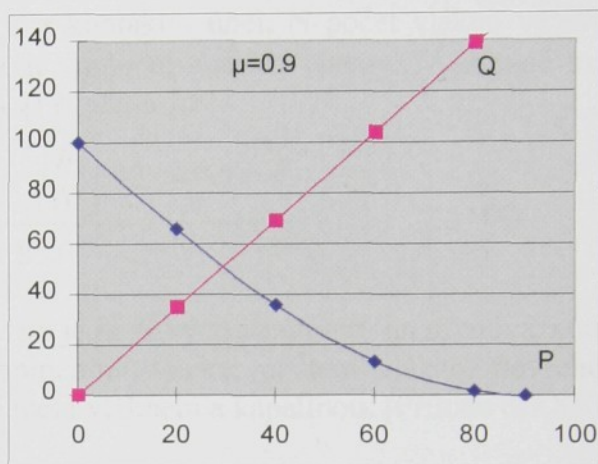
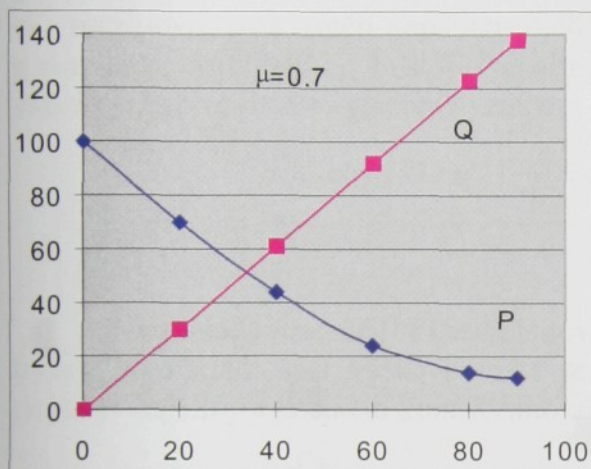


Obr. 11: Vliv hydrostatického podtlaku na křivost povrchu kapaliny na povrchu svazku vláken

Z praktického hlediska je významné, kolik procent povrchu svazku tvoří nesmočený povrch vláken Q a kolik procent kapalina P . Za povrch svazku, ze kterého se tato procenta počítají, se považuje ideální kruh. Povrch svazku tvořený částečně vlákny a částečně povrchem kapaliny je větší než ideální kruh, proto součet P a Q je větší než sto procent. [Příloha 6,7,8]

Hodnoty **P** a **Q** ovlivňují proces a rovnováhu smáčení a lze je vypočítat dle výše vyznačených úvah nebo je lze určit experimentálně – analýzou rovnováhy vztlínání pro svazky s různým počtem vláken a tedy i s odlišným povrchem.

Průběhy závislosti hodnoty **P** a **Q** na kontaktním úhlu pro případ vláken o poloměru $10\mu\text{m}$ a poloměrem křivosti povrchu kapaliny 5mm jsou vyneseny v grafech na obr. 12. Grafy jsou použitelné i pro jiné parametry vláken a nití – jejich vliv nekolísá na obvyklých soustavách tak, aby způsobená chyba byla větší než $\pm 10\%$. [Příloha 6,7,8]



Obr. 12: Vypočtená závislost procentuálního podílu povrchu kapaliny (**P**) a procentuálního podílu povrchu nesmočených vláken (**Q**) z makroskopického obvodu svazku vláken pro různé stupně zaplnění útvaru vlákny (μ)
Osa x ... kontaktní úhel α ve stupních
Osa y ... **P** (resp. **Q**) v procentech

Poloměr křivosti hladiny kapaliny hodnoty **P** a **Q** výrazně neovlivňuje, dokud neklesne poloměr křivosti na řádově stejnou hodnotu, jakou má povrch vlákna. Tento případ by nastal ve výšce několika metrů nad volnou hladinou kapaliny – této výšky na reálných soustavách nelze dosáhnout a proto lze hodnoty **P** a **Q** považovat za konstantní pro jednu soustavu „svazek vláken - kapalina“. [Příloha 6,7,8]

3.4.2 Vztlínání do svislého svazku rovnoběžných vláken

Pro svazky rovnoběžných vláken platí, že přechodová oblast a svrchní oblast mají jen velmi malý vliv na proces a rovnováhu vztlínání. Výpočet rovnováhy vztlínání může být založen na rovnováze sil v řezu hlavní části. V bodě maximální (rovnovážné) sací výšky bude mezipovrchová síla právě kompenzována silou gravitační. [Příloha 6,7,8]

V řezu se pak uplatňují mezipovrchová napětí na těchto mezifázích: [Příloha 6,7,8]

- mezi vláknem a vzduchem (nesmočené části vláken)
- mezi vláknem a kapalinou (smočené části vláken)
- mezi kapalinou a vzduchem (volný povrch kapaliny)

Výpočet rovnováhy vztlínání může být založen na rovnováze sil v řezu hlavní části. V bodě maximální (rovnovážné) sací výšky bude mezipovrchová síla právě kompenzována silou gravitační. Rovnovážná sací výška H_{MAX} je závislá na parametrech soustavy: σ_{LG} mezipovrchové napětí kapalina–vzduch a α kontaktní úhel, N počet vláken ve svazku, g gravitační zrychlení, ρ hustota kapaliny a μ zaplnění svazku vlákny. V případě svazku vláken je tato závislost vyjádřena vztahem (8). [Příloha 6,7,8]

$$H_{MAX} = \frac{\sigma_{LG} \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot \mu - \left(\frac{2}{100} \cdot \sigma_{LG} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \cdot (Q \cdot \cos \alpha + P)}{R_V \cdot (1 - \mu) \cdot g \cdot \rho} \quad (8)$$

Na základě rovnice (8) lze diskutovat vliv jednotlivých parametrů na rovnovážnou sací výšku. Například: sací výška poroste se zaplněním svazku, počtem vláken, povrchovým napětím kapaliny a kosinem kontaktního úhlu mezi vláknem a kapalinou. [Příloha 6,7,8]

V hypotetické situaci, kdy je počet vláken ve svazku nekonečný a povrch svazku lze zanedbat, by byla smočena všechna vlákna v řezu svazku vláken. Složka mezipovrchová síly na povrchu svazku, která potlačuje vztlínání kapaliny, by se neuplatňovala. V případě svazku o nekonečném počtu vláken je rovnovážná sací výška dána rovnicí (9).

$$H_{MAX(n=\infty)} = \frac{\sigma_{LG} \cdot 2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \mu}{R_V \cdot g \cdot \rho \cdot (1 - \mu)} \quad (9)$$

Pokud chceme použít místo základní rovnice (8) zjednodušený vzorec (9) musí být ve svazku jistý minimální počet vláken. Za předpokladu, že akceptujeme maximálně 10% odchylku mezi H_{MAX} a $H_{MAX(n=\infty)}$, je minimální počet vláken ve svazku dán rovnicí (10). [Příloha 6,7,8]

$$N = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{Q_{NK} + \frac{P_{NK}}{\cos(\alpha)}}{10} \right)^2 \quad (10)$$

Počet vláken, pro dosažení maximálně 10% odchylky od rovnovážné sací výšky ve svazku z nekonečného počtu vláken, je závislý na řadě faktorů soustavy. V běžných případech je třeba ke splnění této podmínky alespoň 100 vláken ve svazku.

3.4.2.1 Sací výška ve svazku rovnoběžných vláken nekruhového průřezu

Odchylku tvaru vlákna od kruhu lze vyjádřit pomocí tvarového faktoru q , který definovala Malinowska [4] rovnicí (11). Podstatou takto definovaného tvarového faktoru je porovnávání skutečného obvodu vlákna O_V a obvodu ekvivalentního kruhu o stejné ploše $2\pi R_V$. Pokud je průřez vlákna kruhový, platí $q = 0$, ve všech ostatních případech je $q > 0$.

$$q = \frac{O_V}{2 \cdot \pi \cdot R_V} - 1 \quad (11)$$

V případě, že vlákna nemají kruhový průřez, obecně platí tytéž zákonitosti, které byly použity u vláken kruhového průřezu. Rovnovážnou sací výšku ve svazku z vláken nekruhového průřezu (12) můžeme vyjádřit jako funkce stejných proměnných jako v rovnici (8) a tvarového faktoru q .

$$H_{MAX} = \frac{(1+q) \cdot (\sigma_{LG} \cdot \cos(\alpha) \cdot 2 \cdot \mu) - \left(\frac{2}{100} \cdot \sigma_{LG} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \cdot (Q_{NK} \cdot \cos(\alpha) + P_{NK})}{R_V \cdot (1-\mu) \cdot g \cdot \rho} \quad (12)$$

Situace u vláken nekruhového průřezu je komplikovaná: spočítat parametry P_{NK} a Q_{NK} pro tato vlákna je obtížné, protože záleží na jejich natočení a přesném popisu jejich tvaru.

3.4.3 Vzlínání do příze

V nejjednodušší modelové představě lze považovat přízi za útvar s konstantním zaplněním. Pro příze z konečných vláken je typická hodnota zaplnění 0.5. Pro obdobné útvary z nekonečných vláken přibližně 0.7 a teoretickým maximem je hodnota 0.907, která (plyne z geometrie naskládání válců kruhového průřezu v prostoru.

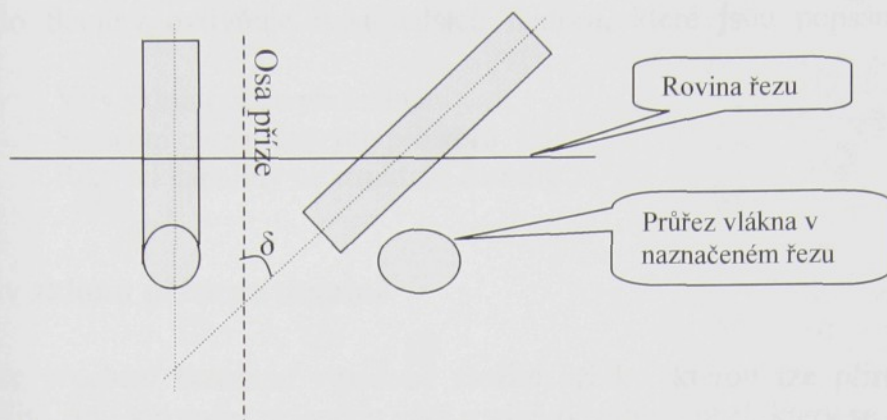
3.4.3.1 Výpočet sací výšky ve svislé přízi

Z praktického hlediska je nutné aplikovat a případně modifikovat výpočty provedené na svazku vláken na vzlínání do příze, základní stavební prvek tkanin a pletenin.

Při přechodu od svazku vláken k běžné přízi musíme počítat s následujícími odlišnostmi:

1. Příze je tvořena konečnými vlákny. Tím vzroste nejen délková nestejnoměrnost útvaru, ale mění se i zaplnění vlákny v závislosti na vzdálenosti od osy příze. Tyto problémy nelze obecně řešit, jedním z důvodů je vedle statistické povahy výsledků i měřitelná změna zaplnění příze vlivem kapilárních sil kapaliny.
2. Příze je zakroucená a proto jsou její vlákna nakloněna vůči její ose

Zákrut je na první pohled tím nejpodstatnějším rozdílem mezi přízí a svazkem vláken. Vliv zákrutu (tedy naklonění vláken v přízi vůči její ose) se projeví deformací průřezu vlákna – z kruhového se stává eliptický – obr. 13. Oproti původnímu řezu vlákna (bez náklonu) došlo k deformaci plochy řezu i obvodu řezu vlákna. Náklon vlákna si lze představit tak, jakoby vlákno bylo nahrazeno silnějším vláknem eliptického řezu. Zdánlivá jemnost vlákna se změní přímo úměrně ke změně plochy řezu. V souladu s tím se změní i zdánlivý poloměr vlákna. [Příloha 6,7,8]



Obr. 13: Zdánlivá změna průřezu vlákna zapříčiněná zákrutem nitě

Pro výpočet sací výšky má velký význam obvod vlákna a povrch vlákna (resp. obvod jeho řezu). Pro popis nekruhovosti vlákna se používá tvarový faktor (11), který lze vyjádřit z rovnosti obvodu elipsy a ekvivalentního kruhu o ekvivalentním poloměru R_{VE} . Pro vzlínání do příže z vláken nekruhového průřezu lze doporučit vzorec (13), který lze chápat jako zobecnění rovnice pro vzlínání do svazku vlákna kruhového průřezu (8).

$$H_{MAX} = \frac{(1+q) \cdot \left(\sigma_{LG} \cdot \cos(\alpha) \cdot 2 \cdot \mu - \left(\frac{2}{100} \cdot \sigma_{LG} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \cdot (Q \cdot \cos(\alpha) + P) \right)}{R_{VE} \cdot (1 - \mu) \cdot g \cdot \rho} \quad (13)$$

Pokud vyjdeme z orientační hodnoty průměrného úhlu naklonění vláken v příži pro bavlnářské příže cca 20° , pak vyjde $R_{VE} = 1,036 \cdot R_V$ a $q = 1,001$ (pro naklonění 30° by vyšlo: $R_{VE} = 1,077 \cdot R_V$ a $q = 1,004$). Změna průřezu vlákna způsobena jeho nakloněním v příži je velmi malá. Tvarový faktor se změnil jen zanedbatelně málo – jeho vliv na sací výšku je nulový.

Na základě tohoto zjištění lze pro běžné příže vliv zákrutu zanedbat. Jediný vliv spojený se zákrutem, který se projeví na sací výšce je změna zaplnění – více zakroucena příže má vyšší zaplnění a tím i vyšší rovnovážnou sací výšku.

3.5 Ustálený stav vzlínání do plošné textilie

Nejsložitějším textilním útvarem, kterému se zde budu věnovat je tkanina. S ohledem na široké spektrum různých tkanin je třeba pojem tkanina konkretizovat: plátňová vazba, dostava i jemnost příží je stejná u osnovy i útku. Obecné úvahy o této tkanině lze aplikovat na veškeré tkaniny a v některých případech i na libovolné plošné textilie.

Tkanina je velmi komplikovaný prostorový útvar, který je vytvořen z příží nebo jiných nití. Příže jsou v tkanině ve zdeformované podobě a jejich deformace se dosud nedaří spolehlivě vypočítat. Obecně dochází ke dvěma deformacím příží: k deformacím osy příže do podoby přibližně sinusoidy a k deformaci průřezu příže vlivem vzájemného kontaktu příží.

Vzlínání do tkaniny ovlivňuje řada dalších faktorů, které jsou popsány v následujících kapitolách:

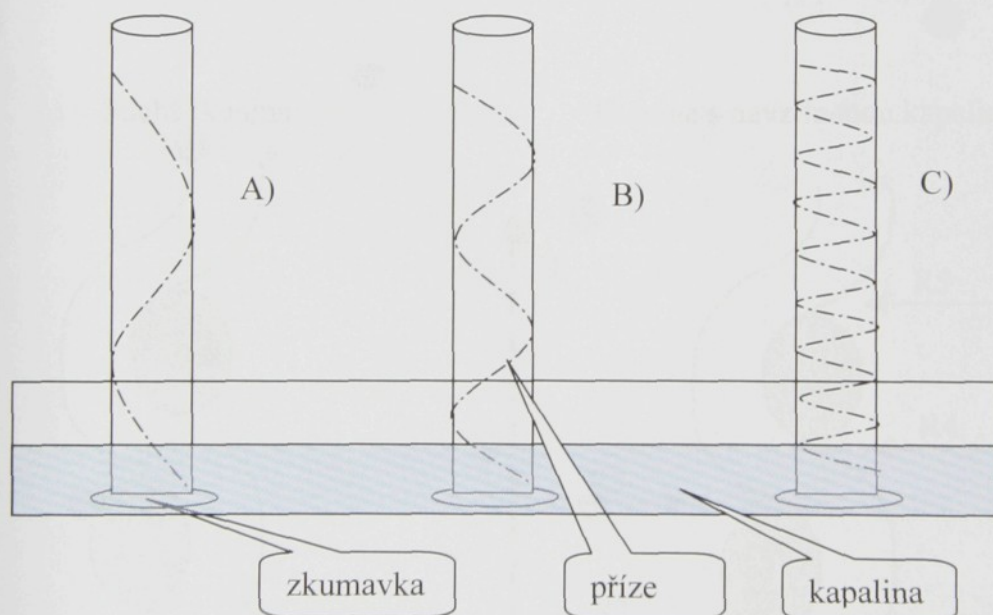
Vliv sklonu příze při vzlínání
Smáčení mezipřízových prostorů
Rozvod kapaliny ve struktuře tkaniny

3.5.1 Vliv sklonu příze ve tkanině

Příze prochází tkaninou v podobě složité křivky, kterou lze přirovnat k sinusoidě (obr. 18). Níť jsou v tkanině skloněny vůči rovině tkaniny o úhel, který se mění v závislosti na poloze sledovaného bodu v přízi. [Příloha 9]

Sklon příze v reálné tkanině je závislý na dostavě, vazbě a jiných textilních parametrech tkaniny. U běžných tkanin plátňové vazby, střední plošné hmotnosti a dostavy přízi byl experimentálně naměřen průměrný úhel sklonu asi 45° vůči rovině tkaniny. [Příloha 9]

Náklon příze byl při vzlínacích testech realizován namotáním příze na průhledný válcovitý nosič, při realizovaném experimentu (obr. 14) byla použita zkumavka o průměru 18,5 mm. Předpětí bylo ve všech případech konstantní – dáno hmotností závaží na konci navíjené příze. [Příloha 9]



Obr. 14: Experimentální uspořádání pro zjištění vlivu sklonu příze na sací výšku

Toto experimentální uspořádání má následující výhody: [Příloha 9]

- příze se neprověšuje
- u příze je dobře definované předpětí
- stoupáním příze ve šroubovici lze realizovat v širokých mezích (obr. 14A,B,C)
- zkumavka s návinem příze je „samonosná“ – nepotřebuje žádný přidavný nosič, držák
- kontaktem nitě se sklem je omezeno odpařování kapaliny z povrchu příze
- zkumavka je průhledná, proto lze snadno detekovat, do jaké výšky kapalina vyvzlínala
- experimenty lze snadno zakonzervovat pro další analýzu

Rovnovážná sací výška není závislá na použitém stoupání šroubovice (náklon příze) – ve všech realizovaných případech byla sací výška prakticky konstantní (pokud se neměnilo předpětí, povrchové napětí kapaliny...). S rostoucím náklonem příze vůči ose nosiče roste i délka úseku příze, do které kapalina vyvzlíná – tzv. sací délka. Hmotnost vyvzlínané kapaliny (respektive sací délka) je vysoce závislá na naklonění příze. Čím je sklon příze bližší vodorovnému směru, tím více kapaliny do ní vyvzlíná. V případě vodorovné příze by množství vyvzlínané kapaliny bylo nekonečné. [Příloha 9]

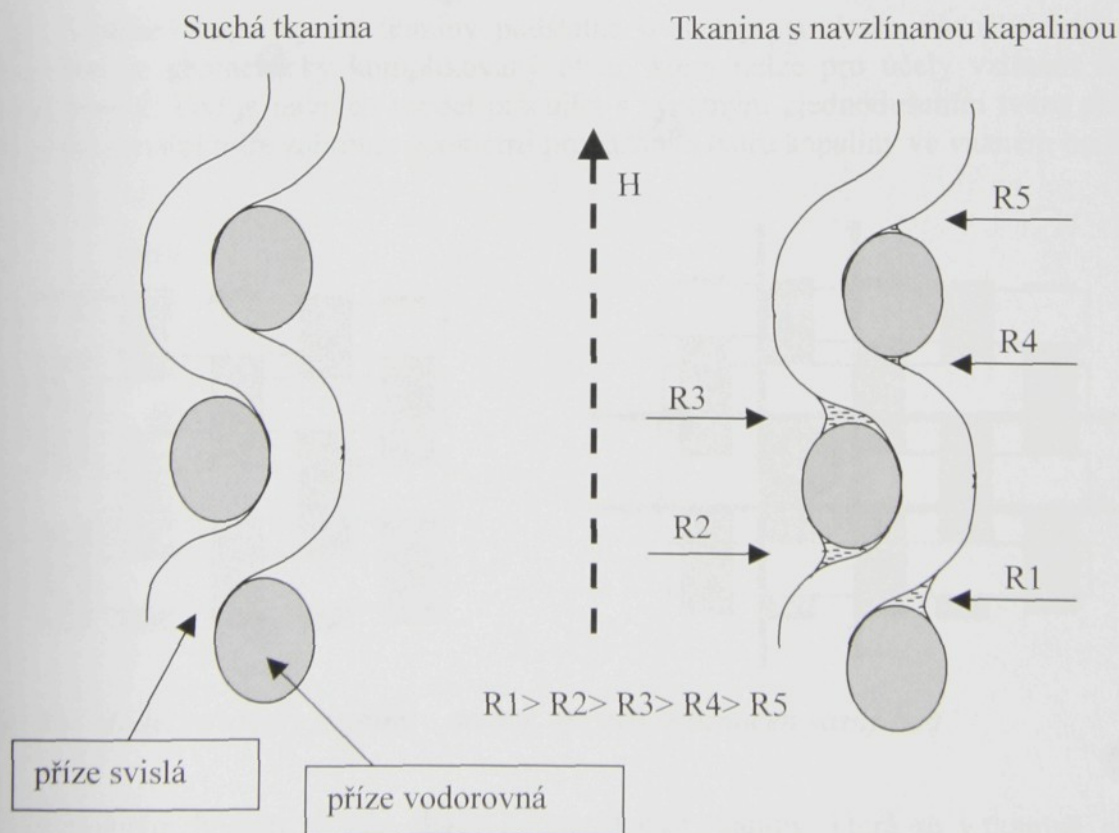
3.5.2 Vztlínání kapaliny do mezipřízových prostorů

Distribuce kapaliny v přízi je prakticky rovnoměrná a její závislost na výšce nad nezakřivenou hladinou kapaliny je zanedbatelná. V tkaninách je situace mnohem komplikovanější. [Příloha 10,11]

Vodu v tkanině je možné rozdělit na:

- kapalinu v přízi (nepatrně závislá na výšce nad nezakřivenou hladinou kapaliny)
- kapalinu mezi přízemi (výrazně závisí na výšce nad nezakřivenou hladinou kapaliny)

Vliv křivosti povrchu kapaliny na zaplňování mezipřízových prostor je patrný na obr. 15, kde je schematicky naznačeno chování kapaliny (o poloměru křivosti R) v jednotlivých mezipřízových prostorech. [Příloha 10,11]



Obr. 15: Řez tkaninou s naznačeným smočením mezipřízových prostor
 R ... poloměr křivosti kapaliny ve výšce H nad nezakřiveným povrchem kapaliny

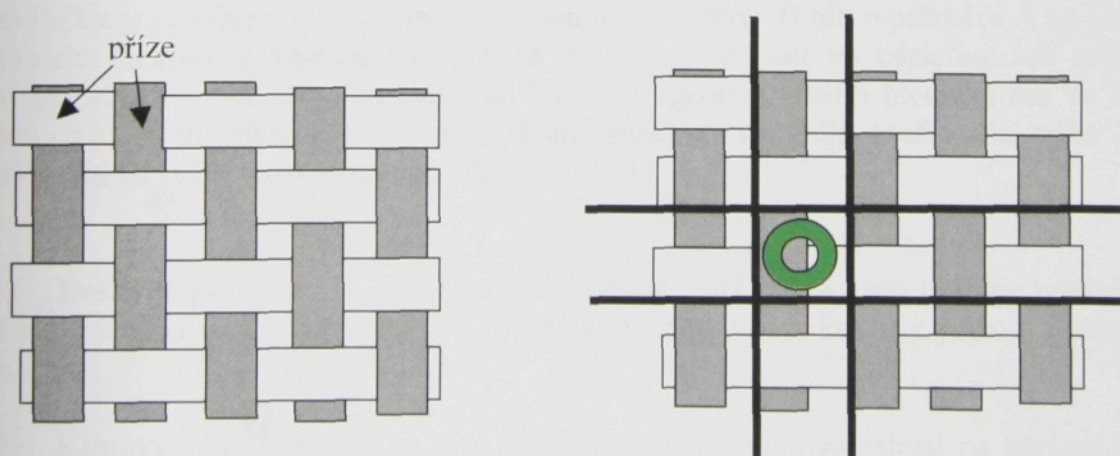
Experimenty sledující zároveň sací výšku i hmotnost vyvzlínané kapaliny provedl Pezron [5], který na základě experimentálních výsledků rozdělil vzlínání do tkanin na dva nezávislé jevy – na vzlínání do přízí a na vzlínání do mezipřízových prostor v tkanině. Mezipřízové prostory se plní kapalinou jen v dolních částech textilie, výše zůstávají sklípky prázdné a kapalina je jen v přízích textilie.

Do určité výšky jsou mezipřízové prostory kapalinou zcela vyplněny a nad ní jsou již téměř bez kapaliny. Z dat od Pezrona [5] a vlastních experimentálních výsledků vyplývá, že mezní výška pro zaplnění sklípků je řádově 10 mm v závislosti na použité kapalině a struktuře tkaniny.

V závislosti na fyzikálních parametrech kapalin a struktuře tkaniny jsou mezipřízové prostory saturovány kapalinou pouze do výše asi 5-20 mm nad nezakřivenou hladinou. Nad touto úrovní se poloměr křivosti povrchu kapaliny dále snižuje a kapalina hůře vyplňuje mezipřízové prostory. U tkanin lze tedy očekávat, že množství kapaliny mezi vlákny bude v dolní části smočené textilie větší než v horní části. Tento jev bude méně výrazný u hustě dostavených tkanin s malými mezipřízovými prostory. [Příloha 10,11]

Poloměr křivosti kapaliny ve výšce H (obr. 15) lze vypočítat pro danou kapalinu pomocí Laplaceovy rovnice. Poloměr křivosti kapaliny, která ještě dokáže vyplnit sklípky v tkanině použité Pezronem [5], je pro testované kapaliny stejný (přibližně 0,25 mm)

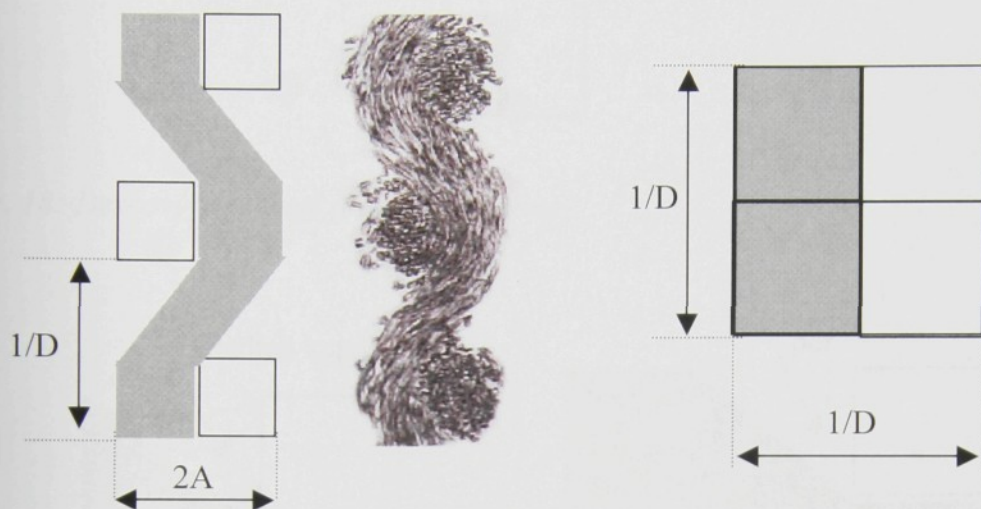
Vzlínání kapaliny do tkaniny podstatně ovlivňuje struktura vazného bodu. Reálný vazný bod je geometricky komplikovaný útvar, který nelze pro účely vzlínání dostatečně přesně popsat. Zde je navržen model pracující s výrazným zjednodušením tvaru příze, který však v maximální míře zahrnuje geometrii provázání a tvaru kapaliny ve vazném bodě.



Obr. 16: Model struktury tkaniny – na obr. vpravo je označen vazný bod

Vazným bodem se zde chápe nejmenší část tkaniny, která se v tkanině periodicky opakuje. Na obr. 16 je schéma tkaniny v plátnové vazbě a na obr. 16 vpravo je označen „vazný bod“, kterým se zde budeme zabývat.

Pro účely popisu geometrie mezipřízových prostorů je nutné poměrně složitou geometrii soustavy zjednodušit – kruhový průřez nitě budeme považovat za čtvercový. Tím se mezipřízové prostory stanou popsitelnými a matematicky spočitatelnými. Převod skutečné situace na zjednodušenou je na následujícím obr. 17. [Příloha 10,11]



Obr. 17: Geometrie vazného bodu (D ... dostava, A ... tloušťka příze v tkanině)
Vlevo: Srovnání geometrie textile - použitý model a reálný řez textilií
Vpravo: vazný bod s kótami

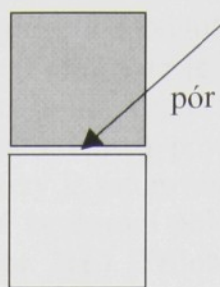
3.5.2.1 Póry mezi přízemi ve vazném bodě

Při hlubší analýze mezipřízových pórů lze vyjít ze zjednodušeného geometrického modelu, který je zobrazen výše (obr. 17). Tkanina o dostavě D nití o průměru A na jeden metr je tvořena plátňovou vazbou. Osnovní a útkové příze jsou na následujících schématech (obr. 18, obr. 19, obr. 20) barevně odlišeny. Z geometrického hlediska lze ve struktuře tkaniny nalézt tři základní typy pórů, které kapalina vyplňuje buď zcela nebo částečně v závislosti na své křivosti povrchu. [Příloha 10,11]

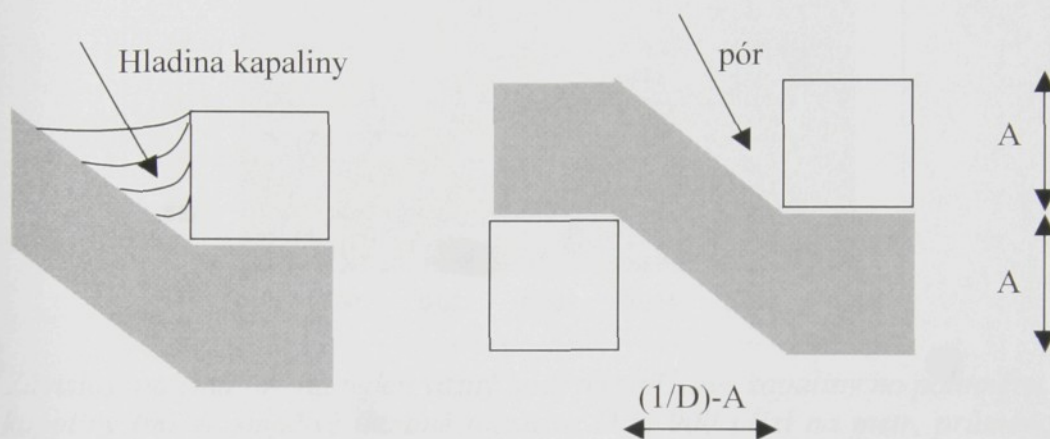
Deskový pór (obr. 18) má tvar tenké desky, jejíž stěny jsou tvořeny povrchy příze. Pór má zanedbatelný objem. Pór se vyplní kapalinou vždy, když je příze ve stěně póru smočena.

Klínový pór (Obr. 19) se plní kapalinou postupně, v závislosti na křivosti povrchu kapaliny. I povrch kapaliny s malým poloměrem křivosti hladiny zaplní část tohoto póru. Při určitém poloměru křivosti hladiny kapaliny dojde k jeho zaplnění kapalinou.

Hranolový pór (obr. 20) se zaplní částečně kapalinou pouze pokud má povrch kapaliny dostatečný poloměr křivosti a s rostoucím poloměrem křivosti se rychle zaplňuje.



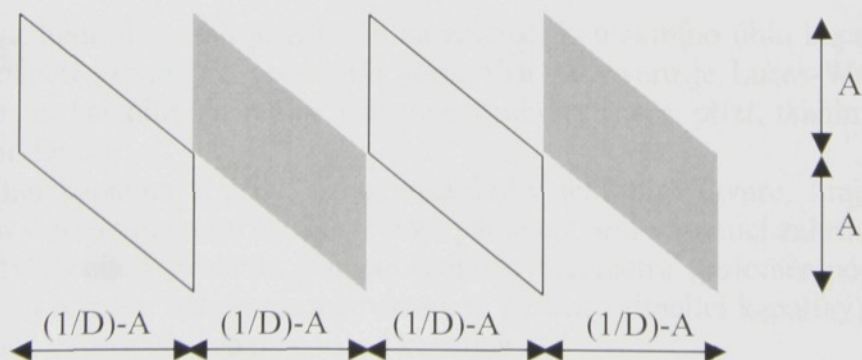
Obr. 18: Deskový pór mezi přízemi v tkanině



Obr. 19 : Klínový póru mezi přízemi v tkanině

Vlevo: hladiny kapaliny v klínovém póru – pro různé hladiny

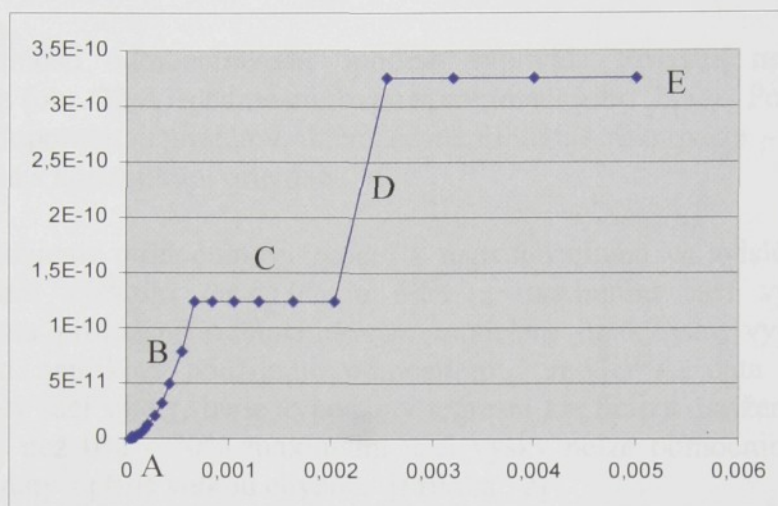
Vpravo: geometrie klínového póru



Obr. 20: Hranolový pór mezi přízemi v tkanině – stěny póru po rozvinutí

3.5.2.2 Celkové zaplňování póru v závislosti na křivosti povrchu kapaliny

Zaplňování jednotlivých typů mezipřízových pórů kapalinou lze vyjádřit jako funkci křivosti její hladiny, která jak již bylo řečeno závisí na sací výšce. Výpočet chování kapaliny v pórech je i přes použité geometrické zjednodušení značně náročný, ale lze jej provést. Ukázkovým výsledkem je následující graf, kde je patrné postupné zaplňování jednotlivých pórů. Pro nulový poloměr křivosti je již zaplněn deskový pór (obr. 21A), s rostoucím poloměrem křivosti (tedy s klesající křivostí) povrchu hladiny kapaliny se nejprve začne zaplňovat klínový pór (obr. 21B), který je saturován (obr. 21C) a následně se skokově zaplní hranolový pór (obr. 21D). Následné zvyšování poloměru křivosti již nemá vliv na zaplnění mezipřízových prostor kapalinou. (obr. 21E). [Příloha 10,11]



Obr. 21: Závislost objemu (m^3 na jeden vazný bod) mezipřízové kapaliny na poloměru křivosti povrchu kapaliny (m) ve smáčivé tkanině (dostava D je 900 přízí na metr, průměr příže je 0,4mm)

3.6 Dynamika vztlínání do textilií

Základním vztahem pro popis dynamiky procesu vztlínání do kapiláry je Lucas-Washburnova [6,7] rovnice, která vychází z rovnováhy mezipovrchových a gravitačních sil pro kapalinu mezi vlákny, průměru pórů v kapiláře a znalosti fyzikálních vlastností použité kapaliny.

Lucas-Washburnův vztah je založen na znalosti kontaktního úhlu kapaliny s vláknem, povrchového napětí kapaliny a geometrie pórů. V tomto tvaru je Lucas-Washburnův vztah pro popis vztlínání kapaliny do reálné vlákenné struktury (např. přízí, tkaniny) nepoužitelný. Zde jsou hlavní důvody:

- Pokud vztlíná kapalina v přízi, nebo jakémkoliv textilním útvaru, hraje roli i hladina kapaliny na svislém povrchu textilie – tento parametr není v rovnici zahrnut.
- Popsat nadvlákennou strukturu pomocí jednoho parametru (poloměr pórů) je nemožné, poloměr pórů se mění s deformací struktury (i vlivem vztlínající kapaliny) a jeho zdánlivá hodnota bude vysoce závislá na použité kapalině

Vhodné je vyjít ze znalosti sací výšky (rovnováhy procesu vztlínání), kterou je snadné zjistit experimentálně a kterou lze pro jednodušší textilní útvary přímo vypočítat. Modifikovaný Lukas-Washburnův vztah může být pak vyjádřen například v podobě rovnice (14).

3.6.1 Exponenciální aproximace Lucas-Washburnova vztahu

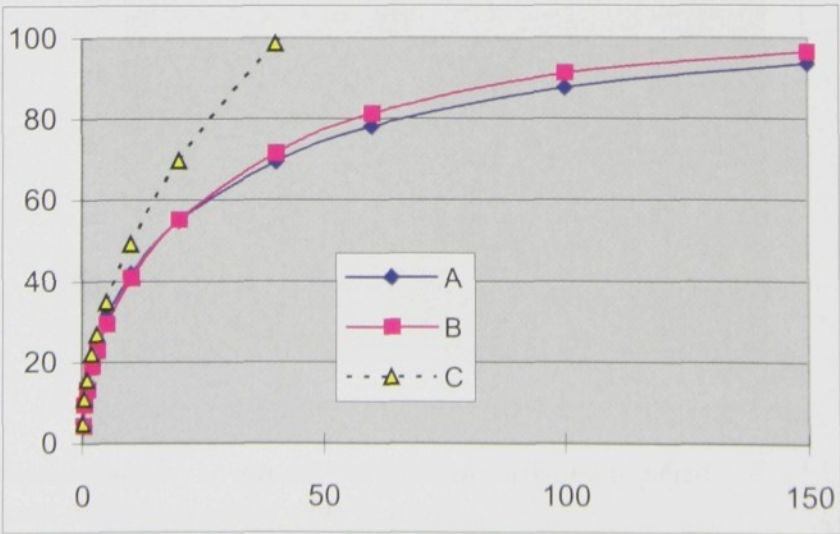
Prakticky se pro popis dynamiky vztlínání používá jednoduchý aproximující vztah, který lze označovat jako **Odmocninovou aproximaci**. Tato rovnice popisuje s vyhovující přesností počáteční část procesu vztlínání. Pokud zvolíme jako kritérium přijatelnosti maximálně 5% odchylku aproximace od reálné hodnoty, pak lze odmocninovou aproximaci použít do dosažení 30% z rovnovážné sací výšky. Nad touto hodnotou chyba odmocninové aproximace prudce stoupá. Tento závěr plyne nejen z regrese numerických dat, ale lze jej pozorovat i na datech experimentálních [8].

O použitelnosti odmocninového modelu vypovídá srovnání numerické simulace dynamiky vztlínání (obr. 22 A) s odmocninovou aproximací (obr. 22 C). Použití odmocninové aproximace lze doporučit u systémů, které se nepřibližují rovnováze – zejména vztlínání kapaliny do textlie s horizontální orientací.

Pokud použijeme odmocninový model k regresi vztlínání ve svislém směru, je třeba pracovat se sacími výškami mezi 0% a 30% z maximální sací výšky. Pokud jsou experimentální data proložena odmocninovým modelem jinak, jsou vypočtené parametry zavádějící. Pokud například použijeme odmocninový model na data mezi 0% a 60% maximální hodnoty sací výšky, bude vypočteny regresní koeficient zatížen chybou cca 20%. Pro interval větší než 0% - 70% maximální sací výšky nelze odmocninový model použít vůbec – prochází daty s příliš velkou chybou. [Příloha 12]

Byla publikována řada dalších modifikací (resp. regresních modelů), které pracují vesměs s mocninným tvarem závislosti sací výšky na čase [9,10]. Tyto modely nenalezly širší praktické uplatnění.

Autorem práce byl navržen nový model aproximující Lucas-Washburnův vztah. Vyšší shodu s experimenty vykazuje nově navržená **Exponenciální aproximace**, která vyhovuje v celém rozsahu časů experimentu. Rozdíl mezi numerickým výpočtem (obr. 22 A) a exponenciální aproximací (obr. 22 B) nepřesáhl 4%. [Příloha 12]



Obr. 22: Srovnání numerického řešení Lucas-Washburnova vztahu (A) s aproximacemi
Osa x ... čas v sekundách
Osa y ... sací výšky v procentech z rovnovážné sací výšky hodnoty

3.6.2 Vliv sklonu příze ve tkanině na dynamiku vztlínání

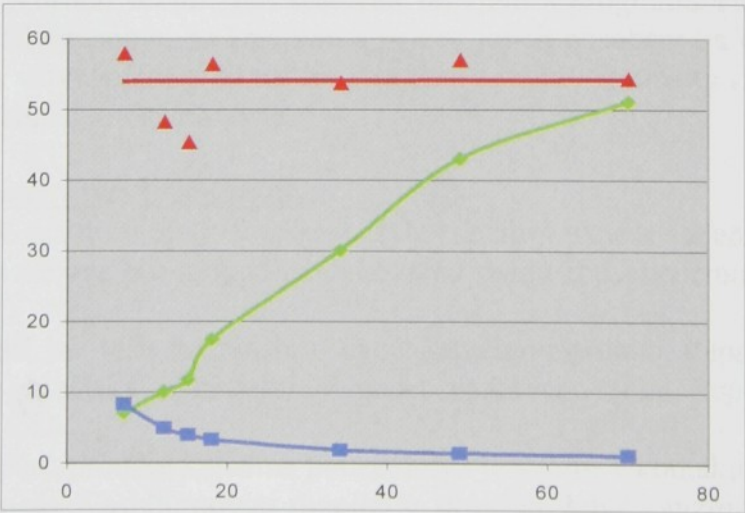
Při sledování dynamiky vztlínání do skloněné příze (obr. 14) lze vyjít z modifikované rovnice (14). Podstatou výpočtu je předpoklad, že tlakový rozdíl způsobující vztlínání kapaliny je konstantní a skloněním příze dojde k prodloužení délky příze s vyvzlínanou kapalinou násobným faktorem **k**, který je závislý na sklonu příze.

Proces vztlínání za sledovaných experimentálních podmínek (obr. 14) byl velmi rychlý, poločas procesu vztlínání byl přibližně jedna minuta. Čím byl sklon nitě bližší vodorovnému směru, tím pomaleji rostla hladina v přízi. Nejrychlejší by tedy bylo vztlínání do příze svislé.

Z rychlosti vztlínání byla vypočtena rychlostní konstanta vztlínání **K**, která je podle modifikovaného Lucas-Washburnova vztahu (14) závislá na převrácené hodnotě **k** (prodloužení kapiláry jejím nakloněním). V této podobě Lucas-Washburnova vztahu (14) dále figuruje doba od počátku experimentu **t**, rovnovážná sací výška **H_{MAX}** okamžitá sací výška **H(t)**, poloměr kapiláry mezi vlákny v přízi **R**, gravitační zrychlení **g**, viskozita kapaliny η a hustota kapaliny ρ .

$$-H(t) - H_{MAX} \cdot \ln\left(\frac{H_{MAX} - H(t)}{H_{MAX}}\right) = t \cdot K \qquad K = \frac{R^2 \cdot g \cdot \rho}{8 \cdot \eta \cdot k} \qquad (14)$$

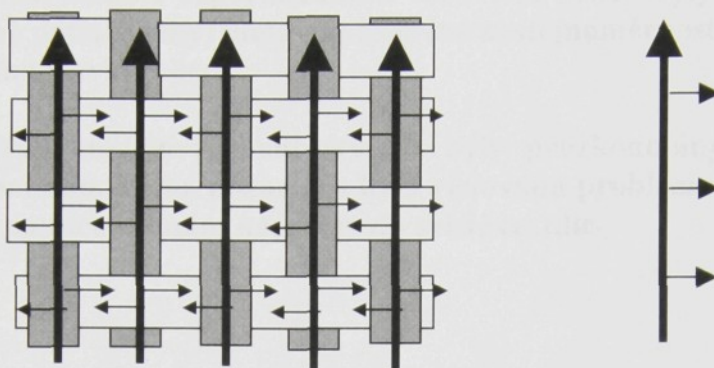
Prodloužení délky příze jejím nakloněním (délka kapiláry lomená výškou horního bodu kapiláry nad volnou hladinou kapaliny) **k** byla stanovena výpočtem z geometrie experimentu pro všechny úhly sklonu příze (obr. 15, modré body a křivka). Hodnota rychlostní konstanty vztlínání **K** byla vypočtena z dynamiky vztlínání podle pokusu na obr. 14 po jednotlivé úhly sklonu nitě (obr. 15, zelené body a křivka). Součin **K.k** je podle navrženého modelu (14) konstantní, to je v souladu s experimentálními výsledky (obr. 23, červené body a přímka). [Příloha 9]



Obr. 23: Zpracované výsledky dynamiky vztlínání do nakloněné příze
osa x ... úhel sklonu příze vůči vodorovné hladině

3.6.3 Dynamika vztlínání do struktury plošné textilie

Vztlínání do svislé tkaniny je komplikováno její síťovou strukturou. Při vztlínání se nejprve kapalinou plní svislá soustava přízí a následně vodorovná soustava přízí a mezipřízové prostory. Tkaninu lze aproximovat jako síť dvou rovnoběžných kanálů, které jsou spojeny v každém bodě vzájemného dotyku. [Příloha 10,11]



Obr. 24: Vedení kapaliny v textilií při vztlínání – síťový model

vlevo: vztlínání do tkaniny, tučné šipky představují hlavní tok kapaliny, obyčejné šipky jsou toky do bočních větví

vpravo: zjednodušená představa vztlínání do síťové struktury (pro simulaci)

Síťová struktury textilií se nemarkantněji projevuje u vlasových tkanin a u pletenin, kde jsou body kontaktu jednotlivých přízí více vzdáleny a proto je čas potřebný k saturaci vodorovné větve delší. U některých pletenin lze vizuálně sledovat, jak nerovnoměrně kapalina proniká do textilie. Nejrychleji postupuje textilií částečné smočení, při které jsou smočeny jen svislé nitě v textilií. Následně je zbývající část textilie zcela smočena kapalinou, tato druhá vlna pokračuje za první s téměř konstantním zpožděním. [Příloha 10,11]

Popis vztlínání do síťové struktury tkaniny je značně komplikovaný. Pro simulaci rozvádění kapaliny plošnou textilií byl sestaven program v programu Famulus. V simulaci byly vždy počítány síly působící na kapalinu a řešeno jejich působení na dynamiku vztlínání. Vztlínání do bočních větví začíná v okamžiku, když se octnou v kontaktu s kapalinou a končí, když je boční větev kapalinou saturována.

Pro simulaci byly použity tyto předpoklady:

1) Pro Newtonovské tekutiny platí: Rychlost toku kapaliny v mezivlákněném póru je podle Hagen-Poiseuilleova zákona přímo úměrná tlakovému spádu způsobenému mezipovrchovými silami.

Toky kapaliny textilií lze řešit nezávisle – svou kapalinou proniká kapalina k jednotlivým cílům z fyzikálního hlediska nezávisle. Výpočet celkového toku kapilárou je součtem jednotlivých dílčích toků.

2) Do jednotlivých pórů proniká kapalina pouze, když je s nimi v kontaktu. Proces pronikání kapaliny popsán Lucas-Washburnovou rovnicí je skončen, když navztlínaná kapalina právě vyplní daný pór.

Z výsledku simulace je patrné, že experimentálně sledované a dosud neobjasněné dvojité vztlínání lze vysvětlit navrženým „síťovým“ modelem textilie. Výsledky simulací jsou v principiální shodě s experimenty.

4 Závěr - shrnutí přínosů práce

Veškeré teoretické analýzy vzlínání a smáčení byly provedeny za předpokladu ideálního chování textilie. V teoretické i experimentální části této práce byly zanedbávány (a v experimentech cíleně potlačovány) efekty způsobené nestejnomořnostmi textilie a ostatní odchylky od ideálního stavu.

Na takto vytvořených modelových substrátech byly prozkoumány vybrané aspekty smáčení textilie kapalinou. Velká pozornost byla věnována problematice smáčení plošné textilie a statické i dynamické vzlínání kapaliny do svislé textilie

Základní dílčí přínosy autora lze shrnout do těchto bodů:

1) Nový model tvaru přisedlé kapky [Příloha 1]

Pro hodnocení smáčivosti plošných textilií se standardně používají kontaktní úhly ustavené mezi povrchem textilie, vzduchem a přisedlou kapkou. Pro vyhodnocování experimentů založených na přisedlé kapce, se běžně používá model předpokládající, že kapka je částí koule (kulový vrchlík). Tento model je ovšem vhodný jen pro malé kapky, které nejsou vhodné pro testování textilních povrchů.

Pro textilie vyhovují kapky většího objemu, pro které je třeba používat komplikovanější geometrický model, který byl v této práci navržen: **kapka ve tvaru části rotačního elipsoidu**. Tento nově navržený model umožňuje analyzovat kapky o optimálních objemech (typicky desítky až stovky mikrolitů vody). Používání tohoto modelu výrazně zpřesňuje metodiku stanovování kontaktních úhlů a nachází uplatnění zejména v testování hydrofobních úprav textilií.

2) Nová metoda stanovování kontaktních úhlů na vláknech [Příloha 2]

V rámci této práce byla vyvinuta nová **metodika stanovení kontaktního úhlu mezi vláknem a kapalinou**. Hlavním teoretickým přínosem je matematické využití fyzikálně definovaného tvaru menisku v okolí vlákna pro aproximaci reálného povrchu kapaliny. Pomocí iterativních výpočtů lze určit okrajovou podmínku použité diferenciální rovnice – kontaktní úhel mezi kapalinou a vláknem. Vedlejším, ale neméně důležitým výsledkem je i **výpočet celkového tvaru menisku v okolí vlákna a objemu kapaliny v menisku** – hmotnost kapaliny v menisku lze matematicky snadno použít ke stanovení kontaktního úhlu. Srovnání kontaktních úhlů vypočtených těmito dvěma postupy (z okrajové podmínky diferenciální rovnice menisku a z hmotnosti kapaliny v menisku) umožňuje u vláken kontrolu správnosti kontaktního úhlu.

3) Teoretická analýza smáčení povrchu na bázi textilních vláken [Příloha 3,4,5]

Kontaktní úhly mezi kapalinou a textilií jsou pouze zdánlivé – jejich velikost není dána Youngovou rovnicí, ale z velké míry i strukturou povrchu textilie. V práci byla velká pozornost věnována **členitosti povrchu vláknenného útvaru** a jejímu vlivu na kontaktní úhel textilie–kapalina-vzduch. Popis geometrie povrchu reálné textilie není k dispozici s ohledem na extrémně komplikovanou strukturu textilie a její nestejnoměrnost. Problém reálné textilie byl řešen na zjednodušeném, ale fyzikálně velmi blízkém modelu struktury tvořené těsně uspořádanými paralelními vlákny (obr. 8). Tento povrch je blízký textilií v mnoha ohledech: zachovává si porozitu reálné textilie, vlákna jsou součástí uspořádané struktury a vzniklá struktura je výrazně anizotropní. Takto definovaný povrch je možné i relativně snadno realizovat a experimentálně ověřit jeho chování. Experimentálně bylo zjištěno, že kontaktní úhly jsou v souladu s navrženou teorií směrově závislé a jejich velikost je v souladu s navrženým teoretickým modelem. Praktickým důsledkem je zjištění, že mechanickou **změnou vzdálenosti vláken v povrchu lze v relativně širokých mezích měnit hydrofobitu textilie**.

Extrémní vliv na smáčivost textilie má stav mezivláknenných pórů. Při smáčení nehraje hlavní roli tvar, velikost či distribuce pórů v textilií, ale jejich obsah. Pokud jsou póry zplněny vzduchem je povrch nesmáčivý, pokud jsou póry zaplněny vodou je povrch vysoce smáčivý. Toto experimentální pozorování je teoreticky analyzováno a vysvětleno. Úvahy a výpočty kontaktních úhlů na textilií s nesmočenými póry v textilií jsou v souladu s Cassie-Baxterovým model smáčivosti povrchu. Za **rozšíření Cassie-Baxterova modelu** je třeba považovat úvahy o smáčivosti textilie s póry zaplněnými kapalinou, které lze vyjádřit matematickou modifikací tohoto modelu. Přínosem je i sama aplikace Cassie-Baxterova modelu na reálné textilie.

4) Analýza ustáleného stavu vztlínání do délkové textilie ve vertikální orientaci [Příloha 6,7,8]

V práci je provedeny detailní analýza kapalinového tělesa, které vzniká při kontaktu délkové textilie se smáčivou kapalinou. Součástí úvah je souvislost křivosti povrchu kapaliny a tlaku v kapalině vyvolaná hydrostatickým tlakem.

Vzniklý kapalinový útvar je formálně rozdělen na tři části, které lze samostatně sledovat. Praktickým důsledkem provedených analýz je zjištění, do jaké míry je povrch svazku tvořen kapalinovým resp. vláknenným povrchem a jak je poměr těchto povrchů závislý na geometrických a fyzikálních parametrech soustavy.

Detailní informace o chování kapaliny v délkové textilií jsou využity v této práci k predikci rovnováhy vztlínání nejen do svazku rovnoběžných vláken ale i do klasických přízí. Tento výpočet ustáleného stavu vztlínání je původní. Základní výhodou z hlediska praktické aplikace je maximální využívání klasického textilního popisu délkových textilií.

5) Analýza ustáleného stavu vztlínání do tkaniny ve vertikální orientaci [Příloha 10,11]

Vztlínání do tkanin je výrazně komplikovanější, než je tomu u délkových textilií. Při vztlínání se uplatňují nejen jevy typické pro délkové textilie, ale i řada dalších jevů: příze jsou v tkanině deformovány vzájemným kontaktem, příze jsou v tkanině vlivem textilní struktury skloněny vůči rovině textilie. Vznikají mezipřízové prostory, které může zaplnit vztlínající kapalina.

Dle experimentálních výsledků i provedených teoretických analýz je při vzlínání do tkaniny důležitá znalost vzlínání do volných přízí. Neméně důležitá je i struktura mezipřízových prostor. V práci je navržena a provedena **analýza struktury mezipřízových prostor v tkanině**, jejichž vliv při vzlínání byl testován pomocí matematického modelu. Na tomto základě lze provést výpočet distribuce kapaliny v textilií při samovolném zaplňování tkaniny kapalinou.

6) Analýza dynamiky vzlínání do svislé textilie [Příloha 9,10,11,12]

S ohledem na praktický význam pokusů sledujících dynamiku vzlínání do textilií jsem se pokusil aproximovat klasickou Lucas-Washburnovu rovnici matematickým modelem, který by umožnil analyzovat závislost sací výšky na čase pomocí jednoduché analytické funkce. V práci byla navržena **exponenciální aproximace dynamiky vzlínání**, která vyhovuje praktickým potřebám. Jsem si vědom, že teoretický přínos navržené exponenciální empirické aproximace je malý, ale s ohledem na přijatelnou odchylku experimentálních a predikovaných hodnot (pod 4%) a s ohledem na časté využívání méně vhodné odmocninového modelu, by mohla být přínosem pro základní vyhodnocování dynamiky vzlínání.

Velká pozornost byla v práci věnována **dynamice vzlínání kapaliny do tkaniny**, kde byl sledován jinde neřešený **vliv náklonu přize ve tkanině** a **vliv síťové struktury tkaniny** na dynamiku vzlínání. Důvodem zájmu o tyto dílčí jevy byl jejich významný vliv na celkovou dynamiku vzlínání do tkaniny. Druhým důvodem je hledání souvislostí mezi dynamikou vzlínáním do volných přízí a dynamikou vzlínání do tkaniny z nich vytvořené. Oba tyto dílčí problémy byly teoreticky analyzovány. Navržené postupy umožňují kvantifikovat tyto vlivy a zahrnout je do budoucího komplexního modelu vzlínání kapalin do plošných textilií.

5 Seznam publikací autora k tématu

a) Časopisy

- [W1] ODVÁRKA, J., DEMBICKÝ, J., WIENER, J., KOVAČIČ, V.: Water-Repellent Finishing of Textiles, Characteristics of Interfaces and Mechanical Parameters, *Vlákna a textil* 9, 2/2002, s. 58-65
- [W2] WIENER, J.: Dynamics of wicking, *Journal of Dong Hua University*, 3/2002, s.77-79
- [W3] WIENER, J. - DEJLOVÁ, P.: Wicking and Wetting in Textiles, *AUTEX Research Journal*, Vol. 3. No.2., June 2003
- [W4] PÍCHAL, J., KOLLER, J., AUBRECHT, L., VATUŇA, T., ŠPATENKA, P., WIENER, J.: Application of atmospheric corona discharge for PES fabric modification; *Czech Journal of Physics*; 54; 2004; 828-834; ; ISSN 0011-4626
- [W5] VATUŇA, T., ŠPATENKA, P., PÍCHAL, J., KOLLER, J., AUBRECHT, J., WIENER, J.: Plasma modification of polyester fabric; *Czech Journal of Physics*; 54; 2004; 475-482; ISSN 0011-4626
- [W6] DEMBICKÝ, J., WIENER, J.: Methoden zur Bestimmung der Kontaktwinkel von Flüssigkeiten beim Kontakt mit Textilfasern, *Melliand Textilberichte*, přijato k publikaci, 2004
- [W7] WIENER, J., DEMBICKÝ, J.: Vliv stavu pórů na smáčivost plošné textilie, *Fibres and Textile*, zasláno do redakce
- [W8]: WIENER, J., DEMBICKÝ, J.: Smáčení vlákenných povrchů, *Fibres and Textile*, přijato k publikaci

b) Mezinárodní konference

- [W9] DEMBICKÝ, J., WIENER, J.: Wetting analysis of plain surfaces and fibres, 3rd International Conference Textile Science '98, TU Liberec, květen 25-27, 1998, s.154, ISBN 80-7083-289-4
- [W10] WIENER, J., KOŠKOVÁ, B., HEJZLAROVÁ, H.: Optimum method for density determination of porous multifilament yarns, 3rd International Conference Textile Science '98, TU Liberec, květen 25-27, 1998, s.162, ISBN 80-7083-289-4
- [W11] DEMBICKÝ, J.- WIENER, J.: Impact of basic dyestuffs on surface properties of PAN fibres, *Textile Science for XXI Century*, červen 8-9, 1999, Portugalsko, ISBN 80-7083-348-3
- [W12] DEMBICKÝ, J., WIENER, J.: Influence of dyeing on surface characterisation of PAN-fibres, *Chemistry Life*, Brno, září 1999
- [W13] WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Rovnováha vztlínání kapaliny do nitě (The Equilibrium of Wicking of Liquid into the Thread), 9. Conference Strutex, 2.- 3. prosinec 2002, Liberec
- [W14] WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Wicking and wetting in textiles, VI international conference (Faculty of engineering and marketing of textiles), 7. březen 2003, Lodz
- [W15] WIENER, J., KHOLOVÁ, I.: Wetting of textile Fibres, Solid/fluid Interface – Euresco Conference, San Feliu de Guixois, Spain, 29 březen – 3 duben 2003

- [W16] WIENER, J., BINĚDOVÁ, M., KANG, Z.S.: Capillary Rise in Fabrics, 5th International Conference Textile Science '2003, TU Liberec, červen 16-18, 2003, ISBN 80 – 7083-11-X
- [W17] WIENER, J., KHOLOVÁ, I.: Wetting of textile Fibres, 5th International Conference Textile Science '2003, TU Liberec, červen 16-18, 2003, ISBN 80 – 7083-711-X
- [W18] DEJLOVÁ, P., WIENER, J.: Review of Wetting Tests, AATCC IC&E, září 9-12, 2003, Greenville, SC
- [W19] WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Review of Wetting Tests, 10. Conference Strutex, prosinec 2003, Liberec, ISBN 80-7083-769-1
- [W20] WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Wetting in sloping thread, 10. Conference Strutex, prosinec 2003, Liberec, ISBN 80-7083-769-1
- [W21] WIENER, J.: Molecular dynamics in textile branch?, 10. Conference Strutex, prosinec 2003, Liberec, ISBN 80-7083-769-1
- [W22] WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Capillary Rise in Fabric, 83rd TUWC, Shanghai, May 23-27 2004, Čína
- [W23] WIENER, J., MORAVCOVÁ, K.: Enzymatic Modification of Polymer Surface, 3rd International Conference on Textile Biotechnology, June 13-16 2004, Graz, Austria
- [W24] WIENER, J., DEJLOVÁ, P.: Prediction of wicking into a thread, World Textile Conference - 4th Autex Conference, Roubaix – France, 22-24 June 2004
- [W25] VATUŇA, T., WIENER, J., MARTÍNKOVÁ, L., ŠPATENKA, P.: Etching of PES by CF₄ and O₂ and comparing of the methods on measurement of the hydrophilicity, World Textile Conference - 4th Autex Conference, Roubaix – France, 22-24 June 2004
- [W26] VATUŇA, T., WIENER, J., MARTÍNKOVÁ, L., ŠPATENKA, P.: Comparison of the geometrically different materials by measurement of the hydrophilicity, 11. Mezinárodní konference Strutex, prosinec 2004, Liberec, ISBN 80-7083-891-4
- [W27] WIENER, J., Nováková, J., ČVRTNÍČKOVÁ, M., DEJLOVÁ, P.: Time changes of sitting droplets on hydrophobic fabrics, 11. Mezinárodní konference Strutex, prosinec 2004, Liberec, ISBN 80-7083-891-4
- [W28] WIENER, J., REVICKÁ, L.: The apparent contact angle on fabric surface, 11. Mezinárodní konference Strutex, prosinec 2004, Liberec, ISBN 80-7083-891-4
- [W29] HORSKÁ, I., MORAVCOVÁ, K., WIENER, J.: Enzymatic modification of polymers, 11. Mezinárodní konference Strutex, prosinec 2004, Liberec, ISBN 80-7083-891-4

c) Národní konference

- [W30] ODVÁRKA, J., DEMBICKÝ, J., WIENER, J., KOVAČIČ, V.: Hydrofobní úpravy textilií, vlastnosti mezifází a mechanické parametry, 4. seminář Strutex, TU Liberec, 3.-4. prosinec 1997, s.72, ISBN 80-7083-267-3
- [W31] WIENER, J., DEMBICKÝ, J.: Vzlínavost kapalin ve vlákenných útvarech (Suction of Liquors in Textiles), 5. pracovní seminář Strutex, TU Liberec, 1.-2. prosinec 1998, s.197, ISBN 80-7083-321-1
- [W32] DEMBICKÝ, J., WIENER, J.: Vliv barvení a chemického namáhání na povrchové vlastnosti polyakrylonitrilových vláken, Transfer '99, Brno, 7.- 8. červen 1999, s.11-19, ISBN 80-214-1341-7
- [W33] WIENER, J.: Vzlínání kapaliny ve svazku vláken, 7. National conference Strutex, TU Liberec, 29.-30. listopad 2000, s.69, ISBN 80-7083-442-0

- [W34] ODVÁRKA, J., STUDNIČKOVÁ, J., WIENER, J.: Vliv aviváže na tření mezi vlákny, 7. National conference Strutex, TU Liberec, 29.-30. listopad 2000, s.57, ISBN 80-7083-442-0
- [W35] WIENER, J.: Dynamika procesu vzlínání kapaliny, 8. National conference Strutex, 3.-4. prosinec 2001, Liberec, s. 351-356, ISBN 80-7083-549-4

d) Ostatní

- [W36] WIENER, J.: Vzlinání kapaliny do délkových textilií, interní zpráva, Výzkumné centrum Textil, prosinec 2001
- [W37] WIENER, J.: software k digitálním vahám, říjen 2002
- [W38] WIENER, J.: Dynamika vzlínání, interní zpráva, Výzkumné centrum Textil, prosinec 2002
- [W39] WIENER, J.: Vzlinání do tkanin, interní zpráva, Výzkumné centrum Textil, říjen 2003

6 Použitá literatura

- [1] Shaw, D. J.: Introduction to colloid and surface chemistry, Butterworths, 1980
- [2] Kwei, T.K.: J. Coll. Interf. Sci., 1968, 28, 543
- [3] Cassie A.B.D., Baxter, S.: Wettability of porous surfaces, Trans. Faraday Soc. 1944, 3, 16.
- [4] Malinowska, J.: Inst. Wol. 1980
- [5] Pezron, I., Bourgain, G., Quéré, D.: Imbibition of a Fabric, Journal of Colloid and Interface Science 173, 319-327, 1995
- [6] Washburn, E.W.: Phys. Rev. 27, 273 (1923)
- [7] Lucas, R.: Kolloid Z. 23, 15 (1918)
- [8] Zhmund, B.V., Tiberg, F., Hallstenson, K.: J. of Colloid and Interface Sci. 228, 263-269 (2000)
- [9] Delker, T., Pengra, D., Wong, P.: Phys. Rev. Lett. 76 (16), 2902 (1996)
- [10] Philip, P.R.: Soil Sci. 84, 257 (1957)

[Příloha 1]

Autoři: ODVÁRKA, J., DEMBICKÝ, J., WIENER, J., KOVAČIČ, V.

Název: **Water-Repellent Finishing of Textiles, Characteristics of Interfaces and Mechanical Parameters**

Časopis: Fibres and Textile (Vlákna a textil)

Ročník: 9

Číslo: 2/2002

Stránky: 58-65

ISSN 1335-0617



WATER-REPELLENT FINISHING OF TEXTILES, CHARACTERISTICS OF INTERFACES AND MECHANICAL PARAMETERS

Odvárka J., Dembický J., Wiener J., Kovačič V.

Technical University of Liberec, Textile Faculty, Hájkova 6, Liberec CZ

1 Introduction

Modern textiles for special use need an application of final finishing, which with relatively low entries make it possible to markedly heighten use characteristics of textile and thereby their realisation price. This work deals with the relation between the application of paraffin-wax water-repellent finishing and silicone finish on mechanical and physical parameters of textile (tenacity, strength, and permeability). Tests were carried out in accordance with [2, 3, and 4]. In present work the original method for the calculation of outer angle of wetting, established during the contact between the distilled water drop and textile is stated. This method was compared with methods used in [5, 9, and 10].

Correlation between quality (homogeneity) of surface film of the final finishing and the resulted water-repellence was found. The quality of the surface film of the final finishing was examined by means of REM, after defined stress of finished textile.

2 THEORY

2.1 Testing of water-repellent treatment

2.1.1 Drop test

This test is based on application of exactly defined drops of solution of isopropylalcohol in water onto textile [20]. Three drops with diameter 5mm of the solution are dropped onto the textile. In case when drop does not soak into the textile within 10 second, it is considered (at given surface tension) that the liquid does not douse the textile.

The solution of isopropylalcohol in water as a test liquid was used in accordance with [20]. The surface tension of this liquid decreases with increasing concentration of isopropylalcohol.

Zero degree of water-repellence represents distilled water with the highest surface tension. The degree of hydrophobicity greater than zero corresponds to blend of isopropylalcohol with water. For the exact composition of the liquid see [20]. For improvement of this method the finer scale with more degrees of water-repellence was introduced (see Fig.1). The aim of the test is to find the liquid with the minimal surface tension, which does not douse the textile. Successively, the liquids with in-

creasing concentration of isopropylalcohol are tested. As soon as at least two drops from three ones soaks the textile, it is assumed that the liquid soaks the textile.

2.1.2 Measuring of contact wetting angle

The drop of water and the surface of textile include the contact (outer) angle. The video camera COHU Colour CCD linked with computer [8] was used for experimental detection of the profile of the drop and also for determination of contact angle. The drop of water was scanned on the fixed and stretched horizontal textile. For the purpose of the test volume and weight of the drop must be constant. For ensuring these conditions liquid was applied by means of micropipette. The optical axis of video camera was set in such a way that it comes through the centre of gravity of the drop and the display plain was perpendicular to the horizontal plain and came through the centre of gravity of the drop. Fig. 2 shows the drops on the textile surface.

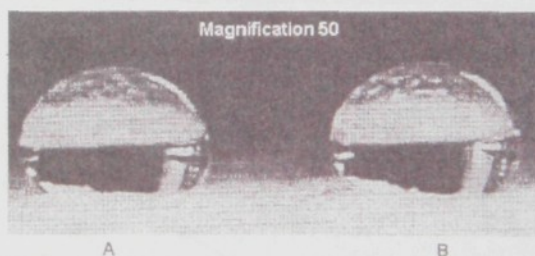


Fig. 2 Microphotograph of the water drops (volume 50 μ l) on the textile treated by silicon and paraffin. A – The drop on the cotton textile treated by Depluv SP – concentration 4,69 g.m^{-2} , size of contact angle – 119,2°, height of the drop – $h = 3,4487$ mm, diameter of the drop on the interface with textile $d = 4,046$ mm. B – The drop on the cotton textile treated by Lukofix T 40D – concentration 2,335 g.m^{-2} , size of contact angle – 118,4°, height of the drop – $h = 3,5102$ mm, diameter of the drop on the interface with textile $d = 4,1841$ mm.

The contact angle was determined from the geometric parameters of the water drop (see 2.2.a). The parameters were measured using image analysis.

2.2 Calculation of a contact wetting angle of the drop on the textile surface

On the basis of present state [5, 9, 10, and 19] the

most widely used relations for calculation of the drop on the textile surface are:

a) The relation derived by Bartell and Zuidema [5, 19]

$$\theta = 2 \cdot \arctg \frac{2h}{d} \quad (2)$$

where θ is outer angle on the interface textile/liquid [°], h is height of the drop [m], d is the length of the contact between the drop and an absorbent [m].

b) The relation derived by Sommer [9]

$$\theta = \arccos \frac{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 - 4}{\frac{4h}{d} + 4} \quad (3)$$

This relation is accepted for the angles in intervals (0, 90)°. The parameters h and d are the same as in equation (2).

$$\theta = \arccos \frac{d - 2h}{d} \quad (4)$$

This relation is accepted for the angles larger than 90°.

Pursuant to our experiments another method for the calculation of the contact angle was proposed. This method results from the algorithms shown below.

2.2.1 The relation resulting from the drop-form of spherical fly

The ideal model of the drop was created. This model results from the assumption that the drop has the form of a sphere. This assumption is considerably simplified, nevertheless significant.

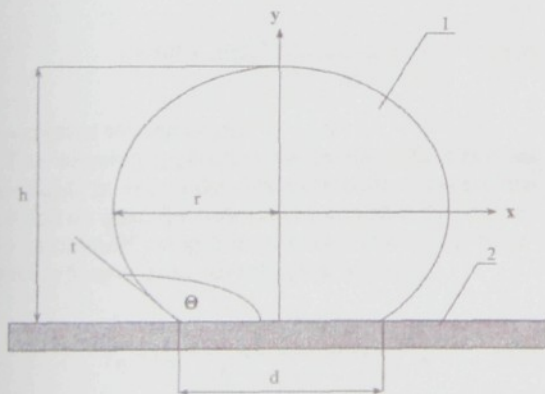


Fig. 3 Spherically shaped drop on the textile surface. 1 – water drop, 2 – textile material, xy – co-ordinated system with the beginning in the centre of a drop, r – radius of a drop [m], h – height of a drop [m], d – diameter of a drop on the interface with textile [m], t – tangent at the terminal point of the contact line between liquid and water, θ – contact angle [°]

Equation of the circle is

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (5)$$

The contact angle θ is greater than 90° for hydrophobic surfaces. This angle is less than 90° in case that the surface is hydrophilic. The aim is to find the first derivation in the point $x = d/2$. The size of wetting angle is then equal to this relation: $\pi \pm \text{tg}(df(x)/dx)$.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad (6)$$

Analytical solution leads to the final relation for wetting angle θ :

$$\theta = 180 - \arctg \frac{4hd}{d^2 - 4h^2} \quad (7)$$

for the contact angles greater than 90° and

$$\theta = - \arctg \frac{4hd}{d^2 - 4h^2} \quad (8)$$

for the contact angles less than 90°.

The relations (7) and (8) give the same values as the Bartell's (2) and Zuidema's relations [5], [19]. If the results are compared with relations (4) and (5) mentioned in [9] (see chapter 3.2.4.), large differences are evident.

2.2.2 Elliptical model of a drop

Scaling of the real drops shows that the model of the drop-form of spherical fly can be replaced by more precise model. This model is based on the intersection of rotating depressed ellipsoid with half-space, whose frontier plane intersects ellipsoid in a circle.

This "elliptic" model has three parameters, in contrast to the above-mentioned "circle" models. These parameters (a , b , m) are shown in Fig. 4. From the geometric point of view it is possible to describe the parameters in this way: " a " – the length of major axis, " b " – the length of minor axis and " m " – the height of the centre of ellipse above the surface of solid state.

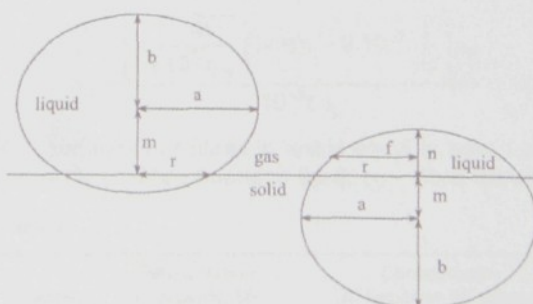


Fig. 4 Elliptical model of a drop; m – distance of the centre of ellipse from the surface of solid state [m], a – length of major axis [m], b – length of minor axis [m], n – height of the drop (liquid douses the textile) [m], r – radius of the contact surface between liquid and solid state [m], f – radius of the drop in the distance $n/2$ above the surface of textile material [m]

For hydrophobic materials it is possible to read the parameters directly. For hydrophilic materials it is necessary to work with the auxiliary parameters (n , r , f – see Fig. 4). These auxiliary parameters can be converted to the basic parameters accordingly to the following relations (9), (10), (11):

$$a = \frac{1}{4}(-4f^2 + r^2)\sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{2f^2 - r^2}}{(-2f^2 + r^2)} \quad (9)$$

$$b = \frac{1}{4}n \cdot \frac{(-4f^2 + r^2)}{(-2f^2 + r^2)} \quad (10)$$

$$m = \frac{1}{4}n \cdot \frac{(-4f^2 + 3r^2)}{(-2f^2 + r^2)} \quad (11)$$

Higher number of parameters leads to the higher precision of the model. The model is more precise and has wide range of applications. If the parameters a , b , m are known, parameter " r " (13) and the volume of the drop (12) can easily be calculated.

The comparison of measured values and the calculated ones can be understood as some feedback of this model. It verifies precision and accuracy of the data.

$$V = \frac{1}{3}\pi a^2(b+m) \cdot \frac{(bm - m^2 + 2b^2)}{b^2} \quad (12)$$

V – volume of drop [m^3].

$$r = a \frac{\sqrt{b^2 - m^2}}{b} \quad (13)$$

Contact angle θ can be determined accordingly to the equation:

$$\theta = 90 + \arctg\left(\frac{am}{\sqrt{b^2 - m^2}b}\right) \quad (14)$$

θ – contact wetting angle [$^\circ$].

The following application the relation (15) is another possibility of this model. The difference of the surface tension on the solid state before and after dipping can be calculated using this relation. The value corresponds to energetic advantage of wetting.

$$\gamma_{sl} - \gamma_{sg} = \frac{b\sqrt{b^2 - m^2}}{\sqrt{b^4 - b^2m^2 + a^2m^2}}\gamma_{lg} \quad (15)$$

γ_{sl} – inter-surface tension, liquid-solid state [N.m^{-1}], γ_{sg} – surface tension at the interface of solid and gaseous phase [N.m^{-1}], γ_{lg} – surface tension at the interface of gaseous and liquid phase [N.m^{-1}].

The "elliptic" model makes possible to calculate the total energy of the drop (surface energy on inter-face

energy, potential energy of the centre of gravity) and subsequently the determination of the most stable form of the drop. However this model goes beyond the aim and the subject of the article.

If the procedures for the determination of the contact angles mentioned above are compared, it can be said that the models of drop-form of spherical fly depend strongly on the weight of the drop. The precision of these models rises if the weight of the drops is going to zero. The "elliptic" model enables to calculate the contact angles for wider range of the weights of drops. It was found experimentally that the values of contact angles are almost the same in the range from 20 to 200 ml. However, it is not possible to appoint the model suitable for arbitrary weight of a drop.

2.3 The quality of hydrophobic films and its relation to mechanical parameters of textile

It is possible to assume that the application of the paraffin and silicon emulsions reduces the cohesive forces among fibres in a yarn. This effect leads to reduction of strength of the yarn and a final fabric. The decrease of the strength depends on many parameters:

- fibre fineness
- staple of primary fibres
- number of twist per 1m of yarn
- structure of textile
- quantity and uniformity of preparation

The results of mechanical parameters can be seen in Fig. 6 and 7.

2.4 Calculation of fibres surfaces

It was determined the surface of fibres in fabric for better describing of concentration of water-repellent agents on textile fibres in area unit of fabric.

The calculation of the surface of fibres, related to 1 m^2 of textile was done accordingly to relation (1).

$$A_c = \frac{\left[\pi \sqrt{\frac{4t}{10^3 \pi \rho_v}} (1+q) l_j + 2 \cdot 10^{-3} \frac{t}{\rho_v} \right] \rho_s}{10^{-3} t \cdot l_j} \quad (1)$$

A_c – surface of all fibres in textile equal to area 1 m^2 [$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$], t – fibre fineness [tex], ρ_v – fibre density

Table 1

Specimen	Concentration of Depluvin SP on the textile [g.m^{-2}]	Concentration of Depluvin SP related to the surface of elementary fibres [g.m^{-3}]
1	0,634	0,0143
2	2,454	0,0554
3	5,160	0,1140
4	12,904	0,2900

$[g \cdot m^{-3}]$, q – shape factor (for cotton 0,45), l_f – fibre length [m], ρ_s – areal weight of textile material $[g \cdot m^{-2}]$.

Numerical values of the parameters are shown in the Tab. 1. After solving equation (1) the total area of fibres in $1 m^2$ of textile was $44,446 m^2$. This value corresponds with the values shown in the tables [15].

3 Experimental

3.1 Specification of textile material and agents

The washed and bleached cotton fabric was used as a textile material. Fundamental parameters determined accordingly to valid specifications are: area weight – $181,2 g \cdot m^{-2}$, warp seff $39 cm^{-1}$, weft seff – $27,4 cm^{-1}$, linear density of warp yarns – 21 tex, linear density of weft yarns – 24,2 tex, fibre fineness – 2,89 dtex, density of cotton – $1520 kg \cdot m^{-3}$ and air permeability of fabric – $0.2026 m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$.

Two types of hydrophobic preparations were used for the finishing:

A) Paraffin-wax emulsion with zirronic soaps

The commercial product DEPLUVIN SP with the following parameters was used:

- slightly cation-active character
- density $1,02 g \cdot cm^{-3}$, at $20^\circ C$
- pH 10% water emulsion 3,5–4,5
- resistance to hard water 10°
- contents of active agents 33,5 %

The composition of Depluvine SP can be characterised by zirronic soaps and by esters of higher fatty acids and higher alcohols.

The Depluvine SP was applied on textile material using foulard. The textile was dried then at $80^\circ C$ for 10 minutes. Concentration of impregnation bath and wet make-weight were set in such a way that resulting concentration of Depluvine SP varied from $0,6 g \cdot m^{-2}$ of textile to $15 g \cdot m^{-2}$ of textile (Tab. 1).

Except of the method mentioned above another more precise indication of the amount of hydrophobic agent on the surface of elementary fibres of given textile was used. (Tab. 1). This version is accepted under condition that hydrophobic agent is spread evenly over all fibres.

Table 2

Specimen	Concentration of Lukofix T 40D on the textile $[g \cdot m^{-2}]$	Concentration of Lukofix T 40D relative to the surface of elementary fibres $[mg \cdot m^{-2}]$
1	0,115	2,580
2	0,544	12,240
3	1,222	27,514
4	2,354	52,963

B) Silicon emulsion

The product of Czech provenience Lukofix T 40 was applied. The characterisation of Lukofix T40 D is:

- emulsion of polyhydrogenmethylsiloxan
- cation-active character
- pH = 2,5–3
- content of dried portion: $30 \pm 2\%$.

This agent is fixed on textile using catalyst C43 or C48. These catalysts are soluble salts of zircon, tin, titanium and aluminium [5]. After impregnation of silicon emulsion on cotton textile (see chapter 2.1.), the sample was dried at $80^\circ C$.

Modification was fixed at $150^\circ C$ for 4 minutes. Final concentrations of silicon agent are shown in Tab. 2.

3.2 Determination of water-repellent according to drop test

The results of measuring using drop test are mentioned in Fig. 3.

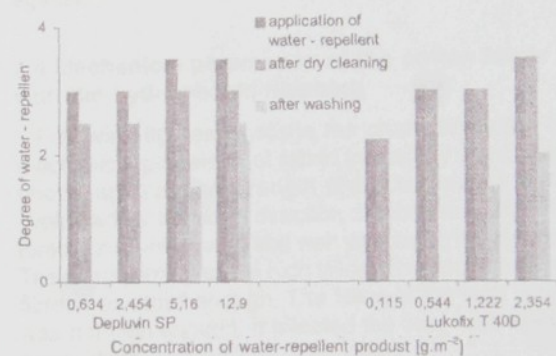


Fig. 1 The dependence of the degree of water – repellent finishing on the concentration of hydrophobic agents on the surface of given fabric.

Results to the fig. 1:

DEPLUVIN				
Nr.	$[g \cdot m^{-2}]$	Degree		
		application of water-repellent	after dry cleaning	after washing
1	0,634	3	2,5	0
2	2,454	3	2,5	0
3	5,16	3,5	3	1,5
4	12,904	3,5	3	2,5

LUKOFIX				
Nr.	$[g \cdot m^{-2}]$	Degree		
		application of water-repellent	after dry cleaning	after washing
1	0,115	2,5	2,5	0
2	0,544	3	3	0
3	1,222	3	3	1,5
4	2,354	3,5	3,5	2

Table 3

V [μ l]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A [mm]	1,7934	1,9634	2,2276	2,4922	2,6173	2,7967	2,9360	3,1155	3,3421
B [mm]	1,5327	1,6600	1,8103	2,037	2,1869	2,2352	2,3456	2,5835	2,2266
R [mm]	1,4723	1,6045	1,7462	2,2089	2,0318	2,2585	2,4356	2,4922	2,9384
m [mm]	0,9294	1,0400	1,3061	1,1389	1,3657	1,3372	1,3855	1,2070	1,1277
H [mm]	2,4621	2,7000	3,1164	3,1759	3,5526	3,5724	3,7311	3,7905	3,3543
D [mm]	2,9446	3,209	3,4923	4,4178	4,0636	4,5169	4,8711	4,9844	5,8767
θ_1 [°]	131,7	133,5	142,0	129,5	133,7	133,0	132,5	122,5	131,4
θ_2 [°]	132,2	133,1	141,7	115,9	138,5	125,6	122,1	121,7	98,1
θ_3 [°]	118,2	118,6	121,5	110,4	129,5	115,4	113,7	113,8	97,6

θ_1 – contact angle determined from the relation (14), θ_2 – outer wetting angle calculated using Sommer's method [9], θ_3 – contact angle resulting from the ideal model of ball (7), (12) resp. [19]

3.3 Results of contact angles calculated by three above mentioned methods

Comparison of the contact angles θ on the cotton fabric treated by Lukofix T 40D with concentration $0,115 \text{ g.m}^{-2}$ can be seen in Tab. 3. The angles were calculated using relations (2), (4), (7) and (14). The parameter h and d , see Fig. 3. The variables for relation (14) see Fig. 3. Various volume quantities of the liquid were applied.

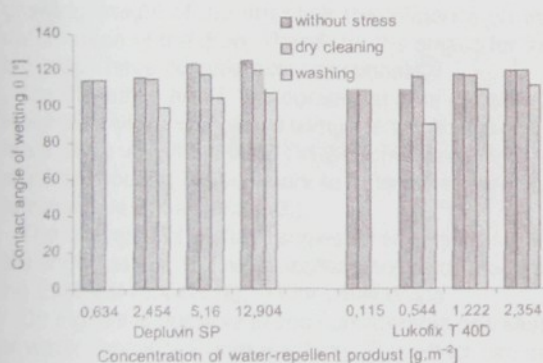


Fig. 5 The dependence of the contact angles calculated using relation (7) on the concentration of hydrophobic agents on the surface of given fabric.

DEPLUVIN				
Nr.	[g.m ⁻²]	Contact angle [°]		
		without stress	dry cleaning	washing
1	0,634	114,4	114,27	0
2	2,454	115,52	115	99,57
3	5,16	123,27	118,24	104,57
4	12,904	125,45	120,13	107,5

LUKOFIX				
Nr.	[g.m ⁻²]	Contact angle [°]		
		without stress	dry cleaning	washing
1	0,115	117,07	116,34	0
2	0,544	117,13	116,5	90,3
3	1,222	117,93	117,26	109,5
4	2,354	119,86	120,3	112,01

The contact angles of the drops on the textile material with the hydrophobic finishing (Tab. 3) were calculated from the geometric dimension of the drop. The dimension of the drop was determined using the image analysis.

Fig. 5 shows the dependence of contact angles calculated using (7) on concentration of hydrophobic agents.

3.4 Mechanical parameters of the cotton fabric with the hydrophobic finishing

Following figures illustrate the characterisation of mechanical properties of fabric treated by the hydrophobic agents. The strength characterisations were evaluated for the warp direction of fabric only, the different structure of warp and weft yarn being the reason. The warp yarns had the high filling. The space among fibres was small enough. The filling of the weft yarns was not high enough. It affected the final mechanical parameters.

4 Discussion

The fabric with water-repellent finishing was investigated under various degrees of stress. The graphic relations show that the both treatments are resistant to dry-cleaning, however, the effect of treatments is markedly reduced after washing.

The contact angles of the drops on the textile material with the hydrophobic finishing (Tab. 3) were calculated from the geometric dimension of the drop. The dimension of the drop was determined using the image analysis. The relevant charts (Fig. 5) show that even the application of low concentration of hydrophobic preparation causes rapid growth of the contact angles.

The dependence of the contact angles on the weight of water drop when models (3), (14) and (7) are used, can be seen from Tab. 3. These models approximate the shape of the drop to the fly of ball. However, the

Fig. 6 The strength of treated cotton fabric compared with original fabric according to CSN 20 0812. Dependence of the tension strength on the quantity of hydrophobic agent at the fibres in given fabric.

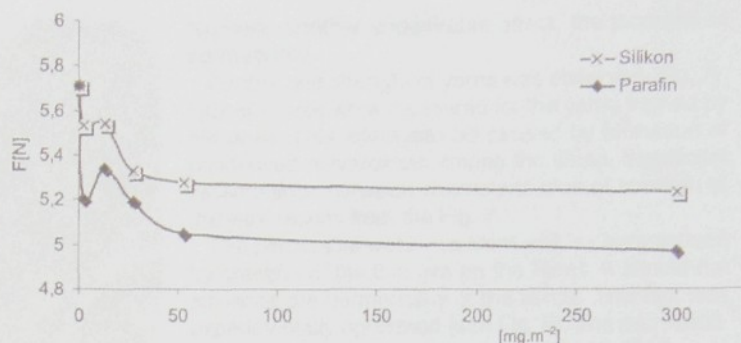
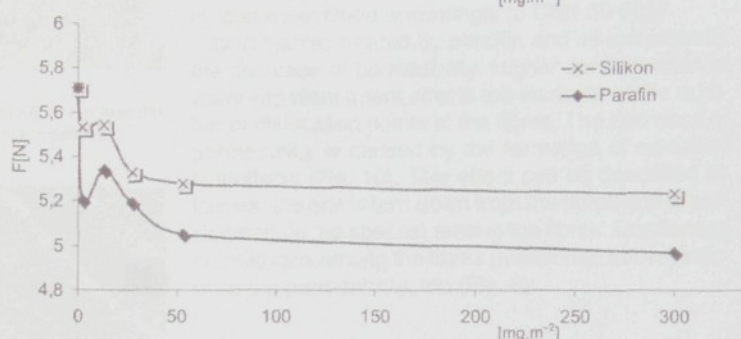


Fig. 7 Dependence of the tension strength of the yarn on the quantity of hydrophobic agent at the surface of fibres in given fabric.



growing weight of the drop has the influence on the deformation of the drop. Therefore, the angles for the big drops have considerable variations.

On the other hand, the contact angles of various weights of drops calculated using the elliptical models have slight variations only. On the other hand, for the elliptical model it is necessary to determine more parameters (see chapter 3.2.3.).

The changes of contact angles after defined stress are shown in Fig. 5. These angles were calculated using the ideal models (2), (7) for small drops.

On Fig. 5 it is possible to see considerable decrease of water-repellence after washing. This effect can be due to removing the layer of hydrophobic agent from the surface of fibres.

The remnant of the washing textile help agents on the fibres can cause this effect, too [2], [11]. These dislocations are observable on pictures from REM (see chapter 4, Fig. 9).

The relation between the surface tension of the liquid and surface energy is important for the printing and marking of textiles and common foils.

Another aim of this study was to find whether it is possible to record the dislocation of edit films by the detailed microphotography and whether this identification correlates with requested parameters of modified textile. The quality and quantity of dislocation of edit were statistically observed. The ascertained data were compared with experimental parameters of edits. The establishment of high correlation between the number of faults (defects) and the quality of edit is the result of this partial study. The microphotography can be recom-

mended as an additional test of quality of films of these final edits.

The drop 3M-test [20], [12] (blend of isopropylalcohol-water) and the detailed measurement of the contact angle were used for the testing of water-repellent (hydrophobic) finishing.

The experimental measurements of the strength (Fig. 6) of fabrics confirmed following facts:

The strength is decreased by the application of the paraffin – wax dispersion. The strength increases slightly at higher concentration of this dispersion. The decrease of strength is caused by the reduction of friction among fibres as mentioned above. On the contrary, the high concentration of the paraffin increases the fric-

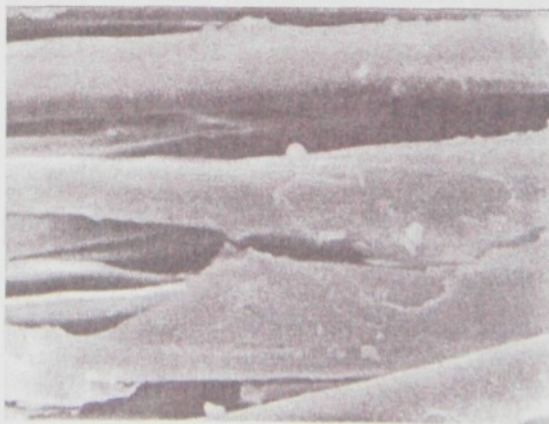


Fig. 8 The microphotography from REM (magnification = 2000). Condensed polysiloxans in the space among the fibres.



Fig. 9 The picture from REM (magnification = 2000). The remainder of water-repellent agent had torn down after washing.



Fig. 10 The microphotography of cotton fibre treated by Depluvin SP (magnification = 2000). There is evident the stripeffect and the preparation among the fibres.

tion among fibres. It is caused by cleaving of hydrophobic agent in the space among the fibres. It means that there are two contradictory effects.

The first effect – decrease of friction predominates for the low concentration of agent. The second effect – fixation of agent among fibres predominates for higher concentrations.

On the other hand, the fabric treated by silicones embodies the contradictory effect. The strength of fabric slightly decreases for higher concentration of the agent. Higher concentration of silicones at the fibres decreases the friction among fibres. The silicones create uniform thin film. The strength of fabric treated by the silicones is higher than the strength of fabric treated by the paraffin. This effect can be proved by microphotographs from REM (see Fig. 10). At the figures it is possible to see the formation of condensed polysiloxans among the fibres in the microstructure of fabric. The condensates increase the strength. There

happens another undesirable effect, the increase of permeability.

Further, the strength of yarns was observed (Fig. 7). Higher values were measured for the yarns treated by silicones. This effect can be caused by formation of condensed polysiloxans among the fibres. Significant resemblance between characterisation of strength of the yarn results from the Fig. 7.

The permeable water-repellent edit is characterised by creation of the thin film on the fibres. It should not influence the permeability of the textile. This fact was experimentally confirmed (see Fig. 8). The permeability was determined accordingly to CSN 80 0817.

Both textiles treated by paraffin and silicon embody the decrease of permeability. Higher concentration of water-repellent agent effects the increase of the number of dislocation points at the fibres. The decrease of permeability is caused by the formation of so-called stripeffects (Fig. 10). This effect can be described as follows: the edit is torn down from the fibres and is precipitated (in the spaces) among the fibres. Condensed polysiloxans among the fibres (mentioned above) influence the permeability, too (Fig. 8).

5 CONCLUSION

Application of water-repellent edits mentioned above decreased markedly the surface tension between the liquid and the textile [1], [16], [18]. This fact is proved by measured degrees of water-repellence and contact angles of cotton fabrics with application of relevant hydrophobic treatment.

Decrease of water-repellence after washing can be seen on Fig. 1 and 5. The treated dislocations after washing are observable on pictures from REM (see chapter 4, Fig. 9).

The textile treated by the paraffin-wax dispersion presents slightly greater contact angle than the textile treated by the silicon emulsion. However, water-repellence of the textile with the paraffin-wax dispersion changes after stress. The treatment based on the silicones has greater resistance (from the point of view of the contact angles) after chemical cleaning and washing.

The geometrical shape of the drop is used for the measurement of the contact angle. The straight measurement of this angle from the enhanced microphotography is not very precise. This contact angle is dependent on the surface energy of solid [13]. The structure of the surface of textile influences this angle, too. This effect was described only qualitatively. The detailed study needs more experimental works and more precise technique of scanning of contact angles [1].

References

- [1] Wakida, T. a kol. "The effect of washing and heat treatment

- on the surface characteristics of fluorocarbon resin – treated polyester" JSDC, Volume 109, September 1993.
- [2] Felix, V. "Chemická technologie textilní I." SNTL 1961, Praha.
 - [3] Blažej, A. "Špeciálne chemické úpravy textílií" Bratislava 1986.
 - [4] Denter, U. "Einsatz wasserlöslicher Zirkoniumverbindungen zur Hydrophobierung textiler Oberflächen" Textilpraxis 1994/49.
 - [5] Ramaszéder, K. "Silikone in der modernen Hydrophob-ausrüstung" Textilveredlung 30, 1995.
 - [6] McAlpine, I. "Ammonium Zirkonium Carbonate, an alternative Insolubilizer for Coating Binders" TAPPI 1982.
 - [7] Soljačić, I. "Der Einfluß von Tensiden auf Hydrophobier – und Oleophobieeffekte bei Textilien" Textilveredlung 18, 1989.
 - [8] Rouette, H.K. "Lexikon für Textilveredlung" Band 2. Laumann – Verlag. Dülmen 1995.
 - [9] Sommer, H., Winkler, F.: "Die Prüfung der Textilien" Springer – Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1960.
 - [10] Latzke, P., M. "Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern" Deutscher Fachverlag. 1988. Frankfurt am Main.
 - [11] Čeřovský, K., Laš, L.: "Silikony pro hydrofobní úpravu textilních materiálů" Textil 34, Praha 1979.
 - [12] Parafinic Water Repellent, Japan Textile News, Vol. 6, 1976.
 - [13] Eagland, D.: "Adhesion and adhesive performance – the scientific background" Endeavour, Vol. 12, 1988.
 - [14] Vojuckij, S. S.: "Autohesion and Adhesion of High Polymers" Polymer Reviews, Vol. 4, New York, 1963.
 - [15] Pospíšil, Z. a kol.: "Příručka textiliního odborníka" 1., 2. Část, SNTL Praha, 1981.
 - [16] Borowiezka, Brzezinski, Cyranski, Meissner a kol.: "Poradnik Inżyniera – włokiennictwo" Warszawa, 1978.
 - [17] Szmeltzer, W., Balcerowski, W., Godek, J., Grudniewski, M.: "Metrologia włokienicza – IV" Warszawa, 1973.
 - [18] Brown, G. H.: Trans.Soc.Rheol. 2, 1958
 - [19] Bartell, F. E., Zuidema, H. H.: J.Amer.Chem.Soc. 58, 1936
 - [20] Water Repellent Fabric Coating: The Text. Inst. a. Ind., Vol. 14, 1976.
 - [21] Behroozi, F., Macomber, H.K., Dostal, J. A., Behrozi, C. H., Lambert, B. K.: The profile of a dew drop, Am.J.Phys. 64 (9), September 1996

Received: march 2002

[Příloha 2]

Autoři: DEMBICKÝ, J., WIENER, J.

Název: **Methoden zur Bestimmung der Kontaktwinkel von Flüssigkeiten beim Kontakt mit Textilfasern**

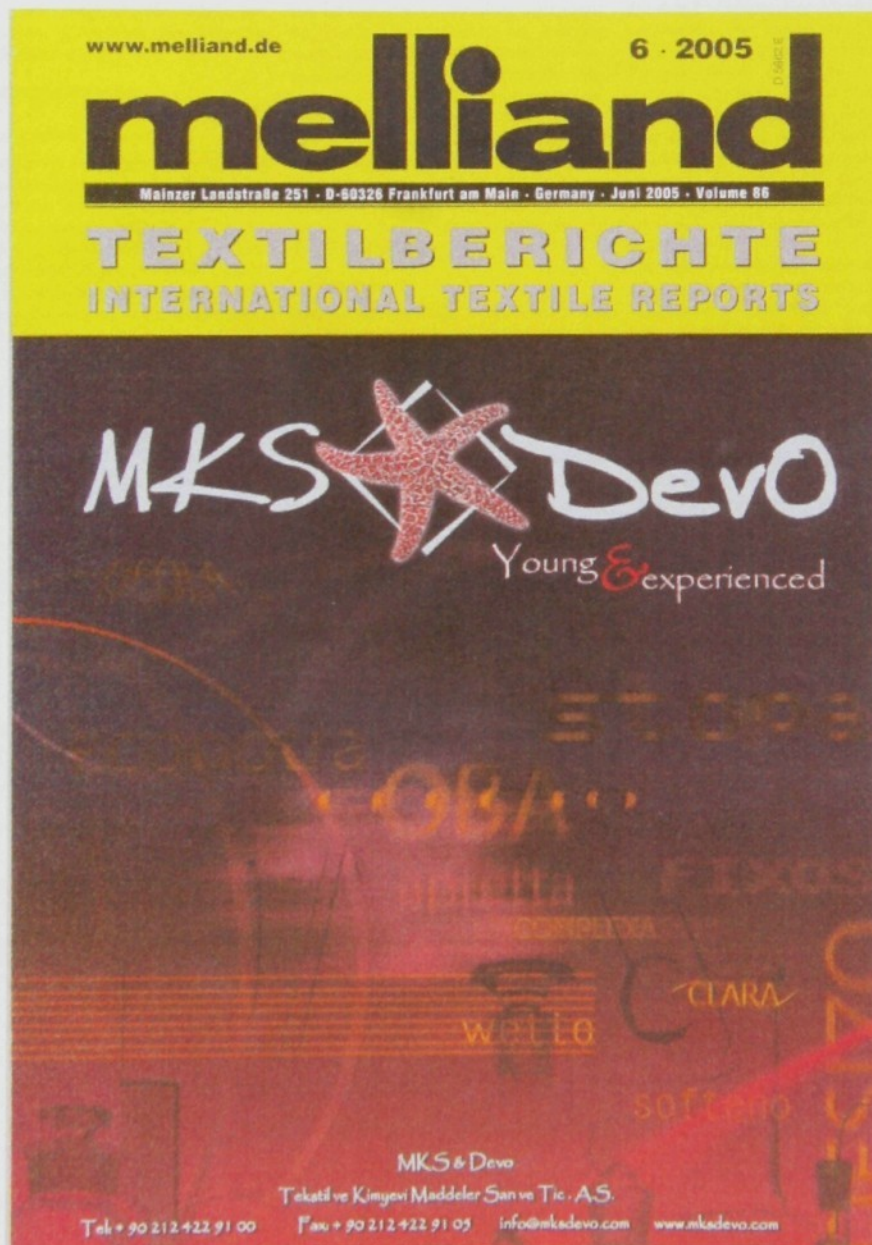
Časopis: Melliand Textilberichte

Ročník: 86

Číslo: 6, Juni 2005

Stránka: 420-423

ISSN 0341.0781



Bestimmung der Kontaktwinkel von Flüssigkeiten beim Kontakt mit Textilfasern

Josef Dembicky, Jakub Wiener, Technische Universität, Liberec/Tschechien

Die Netzfähigkeitsparameter werden oft von den Kontaktwinkelwerten von verschiedenen Flüssigkeiten auf dem Festkörper festgelegt. Die genaue Bestimmung der Kontaktwinkel auf den Textilfasern mit Durchmessern von 10 µm ist jedoch sehr anspruchsvoll. Bis jetzt wurden Methoden verwendet, die oft kompliziert und nicht genau sind. Der Beitrag befasst sich mit der Entwicklung einer Messmethode [1], die diese Probleme reduziert.

In der Arbeit wurde die Abhängigkeit der Netzfähigkeit von der Zeit der alkalischen Hydrolyse von Polyesterfasern untersucht. Zur Messung der Netzfähigkeit wurden drei Methoden benutzt, von denen zwei vergleichende Methoden sind und die 3. Methode eine optische Methode darstellt [1].

Gravimetrische Methoden

- Messung mittels Tensometer

Diese Methode besteht in der Festlegung des Flüssigkeitsgewichts, das beim Kontakt der Faser mit einer Flüssigkeit über die Flüssigkeitsebene aufsteigt [2]. Bei der Bestimmung der Kontaktwinkel der Flüssigkeiten mit den Fasern wird die modifizierte Wilhelmy's Methode angewandt. Die Grundbeziehung ist durch die Gleichung (1) dargestellt [3].

$$Y_{LG} = \frac{F_w}{L \cdot \cos(\theta)} \quad (1)$$

Y_{LG} = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [N·m⁻¹]

F_w = Wilhelmy's Kraft [N]

L = Benetzungslänge [m]

θ = Kontaktwinkel [deg]

Die Netzlänge wird in (2) berechnet:

$$L = 2 \pi r \quad (2)$$

r : Faserdurchmesser [m]

Vor der eigentlichen Messung wird zuerst der Faserradius bestimmt, aus dem die Netzlänge als Eingangsparameter errechnet wird. Dann wird die eigentliche Messung durchgeführt. Die Faser wird in spezielle Klammern befestigt und in die Anlage eingelegt. Im 1. Schritt sinkt die Faser in vertikaler Richtung - es erfolgt die Messung des sinkenden Kontaktwinkels, anschließend wird die Faser nach oben gezogen, es erfolgt die Messung des steigenden Kontaktwinkels.

- Wiegemethode

Die 2. Messmethode nutzt wieder das Prinzip der Wilhelmy's Gleichung (1). Bei dieser Methode wird die Faser in ein Gefäß mit einer definierten Flüssigkeit eingetaucht und die Zunahme des Gewichts der Flüssigkeit verfolgt, die an der Faseroberfläche hinaufsteigt (Bild 1). Im Augenblick des Gleichgewichts gilt die Gleichung (1). Um eine hohe Genauigkeit zu erzielen, wurde eine spezielle Mikrowaa-

ge KERN 770 mit einer Genauigkeit von 0,0001 g verwendet.

Die Faser wurde auf ein spezielles Mikrometer fixiert und in die Flüssigkeit mit konstanter Geschwindigkeit getaucht. Dann wurde das Flüssigkeitsgewicht bestimmt, in dem die Skala auf dem Mikrometer dicht vor dem Trennen der Flüssigkeit von der Faser abgelesen wurde. Danach wurde mit (1) der Kontaktwinkel errechnet.

Optische Methode

Für den Test wurde eine Messeinrichtung verwendet, die aus einem Mikroskop SM6, einem Digitalphotoapparat Nikon Coolpix, einem Glasgefäß und einem speziellen Rahmen für die Fixierung der Fasern bestand [1]. Das System ist in Bild 2 dargestellt. Mit dieser Apparatur wurden die Flüssigkeitsmenisken aufgenommen, aus denen die Kontaktwinkel durch die Verarbeitung mittels Software Lucia 4.1 G der Laboratory Imaging festgelegt wurden.

Die Faser wird in den Fixierahmen eingespannt, sodass sie rechteckig zur Flüssigkeitsebene orientiert ist. Mittels Mikropipette wird in ein spezielles Glasgefäß, das auf dem Mikroskop befestigt ist, die Flüssigkeit eingegossen. Der Rahmen mit der Faser wird dann in das Gefäß eingesetzt (Bild 3). In einem weiteren Schritt wird der Flüssigkeitsmeniskus mittels Fotoapparat mit Fotoadapter aufgenommen. Die Flüssigkeitsebene muss nach dem

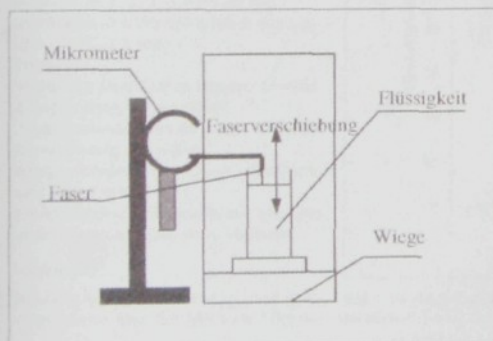


Bild 1 Messprinzip Wiegemethode

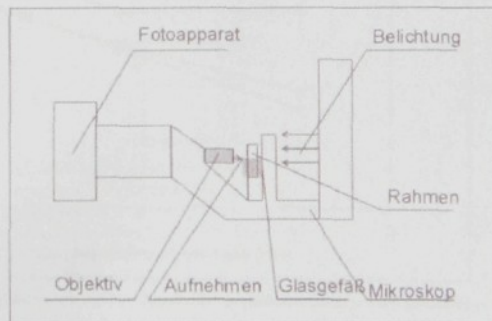


Bild 2 Darstellung der Messapparatur für die Festlegung der Kontaktwinkel mittels der neuen Methode

Einsetzen des Rahmens mit der Flüssigkeit den Gefäßrand überschreiten, damit ein Meniskus aufnehmbar ist. Um diesen Zustand zu erreichen, muss man unter den inneren Rand des Gefäßes ein Teflonband kleben.

Nach dem Einsetzen des Rahmens ist zu warten, bis die Flüssigkeit sich nicht mehr bewegt. Danach wird die Aufnahme fertiggestellt.

Diese Aufnahme wird mittels Bildanalyse LUCIA 4.1 G der Firma Laboratory Imaging verarbeitet [4]. Es wird direkt der Winkel zwischen Flüssigkeit und Faser gemessen. Vor der eigenen Messung wird eine Kalibrierung durchgeführt. Für eine schnelle Messung sind Flüssigkeiten mit höherer Viskosität geeignet (Methylenjodid, Ethylenglykol), bei denen es zu besseren Abschwächungen der Einschläge und somit zur schnelleren Stabilisierung der Flüssigkeitsebene kommt als bei Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität (Wasser, Heptan).

Experimentaltell

Für die Bewertung der 3 Methoden wurde die Abhängigkeitsüberwachung der Netzfähigkeit einer Polyesterfaser analog der Zeit für die alkalische Hydrolyse gewählt. Aus dem festgelegten Kontaktwinkel wurde sein Cosinus und die Adhäsionsarbeit errechnet. Die Beziehungen für die Festlegung der Adhäsionsarbeit sind in [1-3] erwähnt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Einfluss der alkalischen Hydrolyse auf die Netzfähigkeit der Polyesterfaser

- Versuchsdurchführung

Polyesterfaser, Durchmesser 0,441 mm, Gewicht 1,320 g/cm³, behandelt mit organischer Lösung.
Alkalische Hydrolyse: Bad: 20 g/l NaOH, 4 g/l kationaktives Hilfsmittel, 1 g/l Dispergiermittel, FV 1:40, 90 °C
7 Muster mit verschiedener Verarbeitungszeit: 0, 1, 2, 3, 5, 10 à 20 min
Anschließend 3 Waschenstufen durchgeführt (20 °C, à 5 min)
Trocknen
Flüssigkeit: Destilliertes Wasser, Oberflächenspannung - 72,8 mN·m⁻¹, Dispersionskomponente der Oberflächenspannung - 26 mN·m⁻¹, Polarkomponente der Oberflächenspannung - 46,8 mN·m⁻¹
Messmethoden: Wiegemethode, Messung am Tensiometer Krüss, neue Methode

Auswertung

Das Ziel der Arbeit bestand in einer kritischen Auswertung der Methoden für die

Festlegung der Fasernetzfähigkeit, gleichzeitig sollte eine neue Messmethode vorgestellt werden.

Die Wiegemethode hat im Vergleich mit der neuen Methode gleiche Ergebnisse gebracht. Die Messung am Tensiometer ergab nicht die gleichen Ergebnisse, je-

doch ähneln den Ergebnissen der beiden anderen Methoden. Bei allen drei Methoden ist festzustellen, dass sich die Netzfähigkeit mit zunehmender alkalischen Hydrolyse erhöht. Diese Tatsache kann durch die Beschädigung der Faseroberfläche durch NaOH erklärt werden. Ein Bei-

Tabelle 1 Mittelwerte der Kontaktwinkel und Adhäsionsarbeiten

Zeit der Hydrolyse [min]	Kontaktwinkel [°]			Adhäsionsarbeit [J·m ⁻²]		
	WM	NM	Krüss	WM	NM	Krüss
0	54,37	61,63	68,37	0,1140	0,1062	0,0986
1	49,00	49,53	57,58	0,1192	0,1187	0,1106
2	45,26	44,70	51,43	0,1227	0,1232	0,1168
3	44,13	44,09	50,64	0,1237	0,1237	0,1176
5	42,63	42,31	51,19	0,1249	0,1252	0,1170
10	35,24	36,32	43,80	0,1308	0,1300	0,1239
20	22,36	25,88	44,30	0,1385	0,1368	0,1235

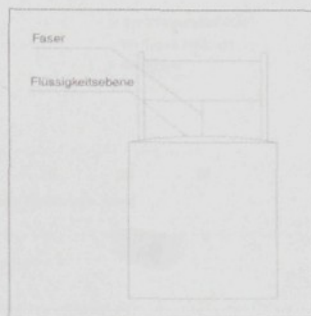


Bild 3 Schema des Fasermusters für Kontaktwinkelmessung mit der neuen Methode

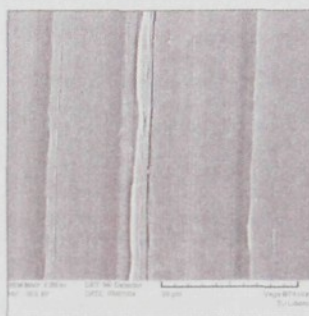


Bild 4 PES-Faser ausgerüstet 3 min durch alkalische Hydrolyse

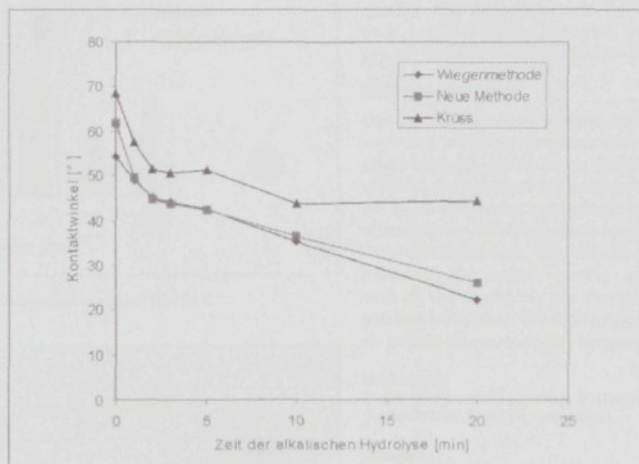


Bild 5 Vergleich Kontaktwinkel in Abhängigkeit der alkalischen Hydrolyse zwischen den getesteten Methoden

spiel der beschädigten Polyesteroberfläche ist in Bild 4 dargestellt.

Die Abweichung am Tensiometer stammt aus der Empfindlichkeit der Methode auf die Qualität der Muster. Das Muster muss gerade sein, was hinsichtlich des Mustertyps (Faser) das Hauptproblem war. Diese Methode ist für ebene Flächen geeignet

(Folien, Platten), aber bei kleinen und geometrisch komplizierten Formen (z.B. Fasern) ist die Mustervorbereitung sehr kompliziert. Die Werte der Kontaktwinkel waren im Vergleich zur Wiegemethode und der neuen Methode größer.

Die neue optische Methode ist eine für die Praxis anwendbare Methode, um den

Kontaktwinkel an herkömmlichen Fasern zu messen. Die Wiegemethode und die Messung am Tensiometer sind hinsichtlich des Messbereichs, dessen Minimum bei beiden Methoden 0,0001 g ist, für herkömmliche Fasern nicht geeignet.

In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der Kontaktwinkel und der Adhäsionsarbeit dargestellt, die bei den einzelnen Messmethoden gewonnen wurden. Die graphischen Abhängigkeiten sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Für die objektive Auswertung der Genauigkeit wurden die Messstreuungen festgelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Bild 7 dargestellt. Die Unterschiede bei den einzelnen Methoden stammen von der Messgenauigkeit, der Materialabweichung und der Musterqualität. Bei beiden gravimetrischen Methoden spielen die letzten beiden Einflüsse eine große Rolle. Wird bei den gravimetrischen Methoden von einer Genauigkeit der Waage von 0,0001 g ausgegangen, so beträgt die Abweichung des Kontaktwinkels 0,64°. Die Materialabweichung kann durch die Aufzersetzung der Fasern begründet werden, die durch die Hydrolyse entstanden ist. Beim unbehandelten Muster sind die Messstreuungen bei allen Methoden niedrig. Bei den behandelten Fasern sind sie größer. Die geringste Genauigkeit hatte nach den Messstreuungen die Methode der Messung am Tensiometer Krüss. Größten Einfluss auf die Variabilität hatte bei dieser Messmethode die Musterqualität.

Bei der neuen Methode spielt die Musterqualität eine untergeordnete Rolle. Die neue Methode liefert geringere Streuungen als die gravimetrischen Methoden.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Entwicklung und dem Vergleich einer optischen Methode zur Messung des Kontaktwinkels, die schon in [1] vorgestellt wurde. Beim Vergleich der Methode mit gravimetrischen Verfahren wurde festgestellt, dass die Ergebnisse, die mit der neuen Methode gewonnen wurden, genauer sind als die Ergebnisse aus den gravimetrischen Methoden. Die Genauigkeit wurde mittels Messstreuungen festgelegt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von "GACR 104/03/P031" (Tschechische Republik) unterstützt.

Literatur

- [1] Dembicky, J.: Melland Textilberichte 84 (2003), 398-400
- [2] Berg, J.C.: Wettability, New York 1993
- [3] Anweisung für Arbeit mit Tensiometer Krüss K12
- [4] Anweisung für Arbeit in Bildanalyse Lucia 4.1 G

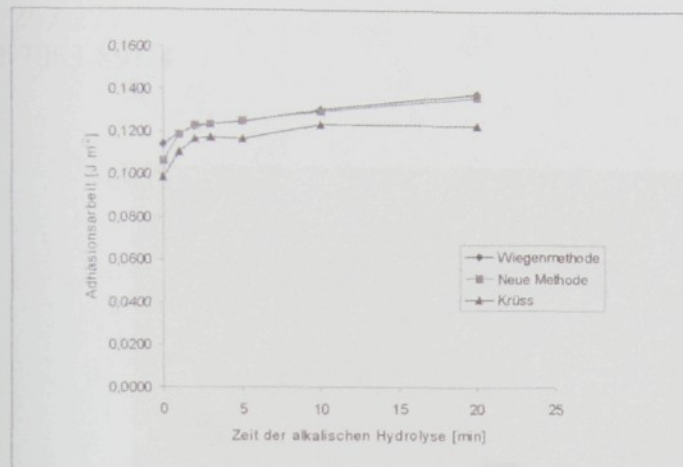


Bild 6 Vergleich der Abhängigkeit der Adhäsionsarbeit

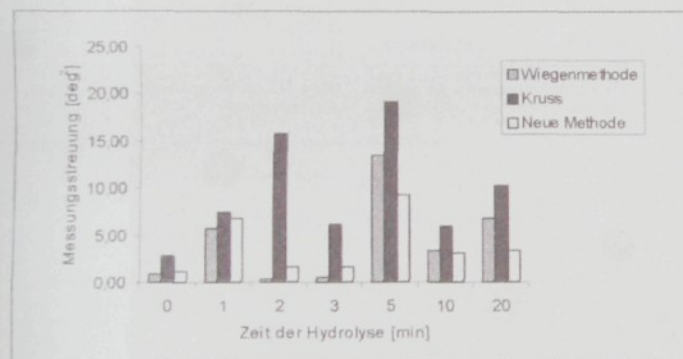


Bild 7 Graphische Darstellung des Vergleichs der Messstreuungen aus Tabelle 2

Zeit der Hydrolyse [min]	Messstreuung [deg²]		
	WM	NM	Krüss
0	0,92	1,17	2,79
1	5,67	6,82	7,48
2	0,31	1,57	15,70
3	0,55	1,58	6,16
5	13,49	9,25	19,16
10	3,37	3,10	5,96
20	6,83	3,32	10,23

[Příloha 3]

Autor: WIENER, J., REVICKÁ, L.

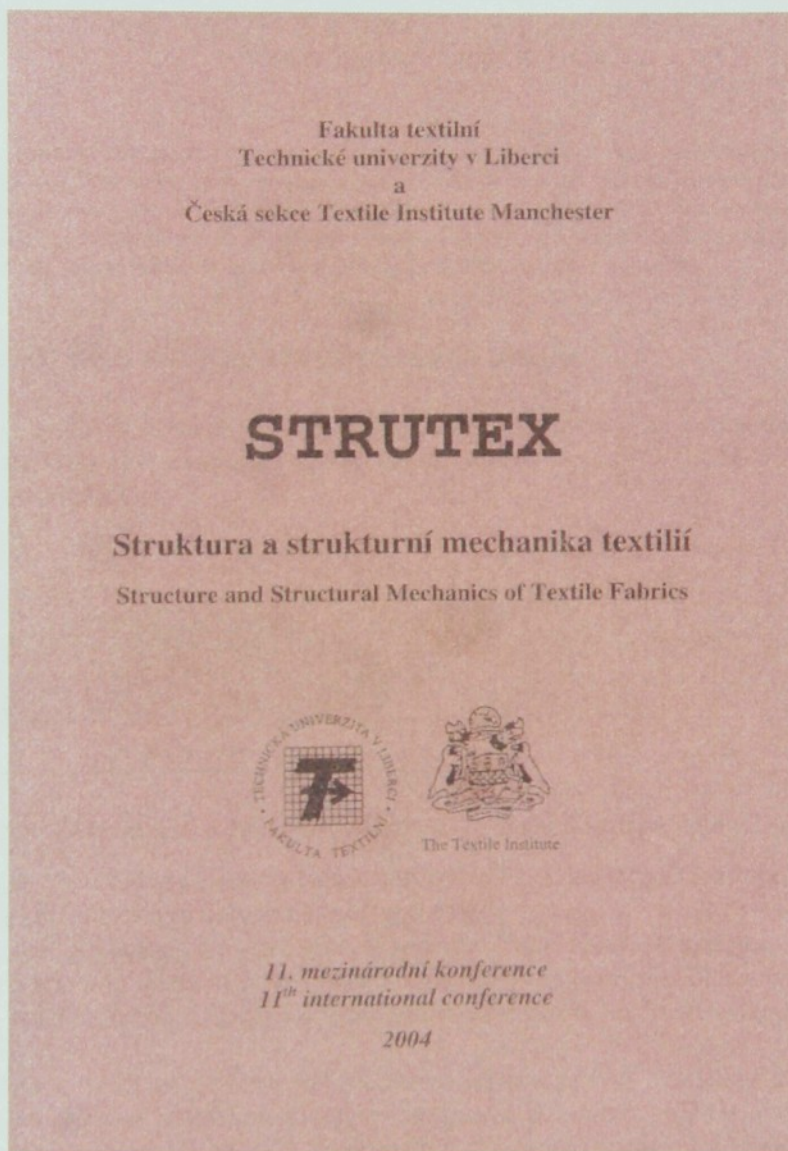
Název: **The apparent contact angle on fabric surface**

Konference: 11. Mezinárodní konference Strutex

Konaná: prosinec 2004, Liberec

Stránky: 267-271

ISBN 80-7083-891-4



STRUTEX

11th International Conference

TU Liberec, December 2004

THE APPARENT CONTACT ANGLE ON FABRIC SURFACE

Jakub Wiener¹, Lucia Revická²

Abstract:

The work is aimed at contact angle between liquid and a fabric surface. The contact angle rated on a fabric is necessary apparent. The value of the contact angle is depended on not only at properties of used fibres, but on their overfibre structure and on inter-fibres pores state. Dry pores defend of fabric wetting. Wetting of surface allowances a pores filling of liquid. Feedback of state of pores on a wetting fabric is at this work theoretically analyses. Bearing of real fabrics is possible to predict on a basic of gainly equations.

1. The real and an apparent contact angle

The contact angle is a basic parameter of wetting materials. The contact angle on ordinary surfaces materials (for examples: glass, plastic and so on....) is given of balance between inter-surface potentials:

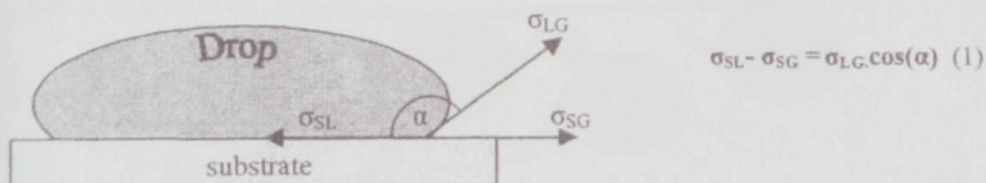


Fig. 1: Sitting drop on a homogeneous substrate – potential actuate on a phase of interface:

σ_{LS} surface energy between liquid and growth medium (rigid material)

σ_{LG} surface energy between liquid and gas

σ_{SG} surface energy between growth medium (rigid material) and gas

An angle α is given of power balance (let us say - potentials) of contact three phases (S- rigid material, L- liquid, G- gas) in the course of a medium surface growth.

We identify a contact angle on a perfect fluent surface as real. As far as a surface of tested material is rough, then rated contact angle is apparent. A contact angle is not on consist end in chemical composition of surface, it is dependent on a rate of surface roughness.

The situation is more complicated of porous inhomogeneous structures, whose exemplify is fabric, then of homogeneous growth medium introduce above. A contact angle is possible to follow beside of contact liquid with fabric material, which is again necessary think onto an apparent.

¹ Ing. Jakub Wiener, Ph.D., Katedra textilního zušlechťování, TF, TU Liberec, jakub.wiener@vslib.cz

² Ing. Lucia Revická, KZU, TF, TU Liberec, studentka doktorského studia

2. The contact angle on fabrics

The contact angle between liquid and a fabric is given not only roughness of textile surface, but state of inter-fibres pores (pores may be fill in of gas or liquid). If a liquid come to contact with a fabric, a contact angle is produced in commensurate with on a dry or wet fabric. A difference is possible to clear up of different orientation inter-surface power liquid-gas under the setting drop. From next figure is difference apparent (fig.2):

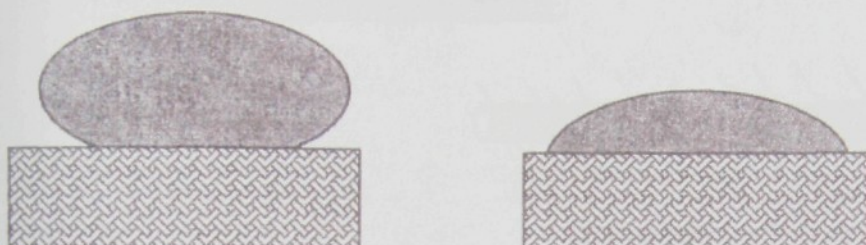


Fig. 2: a) Drop on dry material

b) Drop on wet material

Comment: The situation is complicated by fuzziness of fabric surface, which will be deformed of weight setting drop.

The more detail situation is schematically illustrated on the fig. 3 and on the fig.4 (on a yarns and inter-yarns area grade):

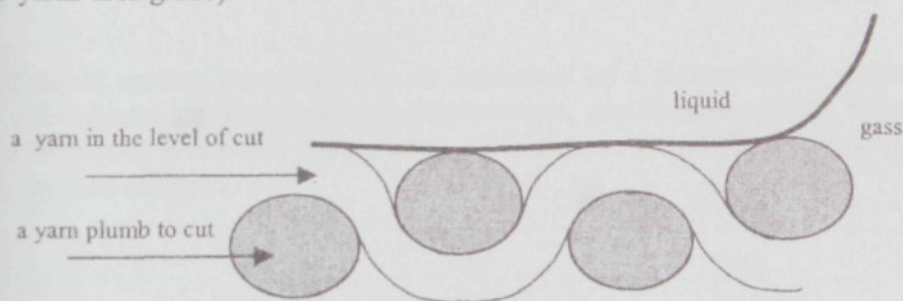


Fig. 3: The detail of liquid contact with dry growth medium – the same situation as on the fig.2a)

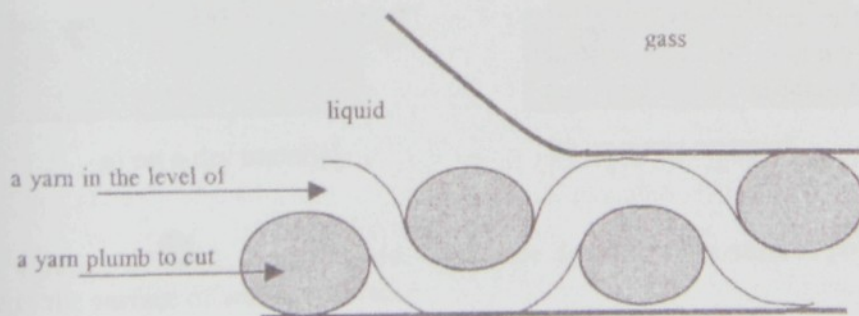


Fig.4 : The detail of liquid contact with wet growth medium – the same situation as on the fig.2b)

The situation of liquid on a fabric surface in the fibre measurement and inter-fibres ranges is illustrated on a fig.5.

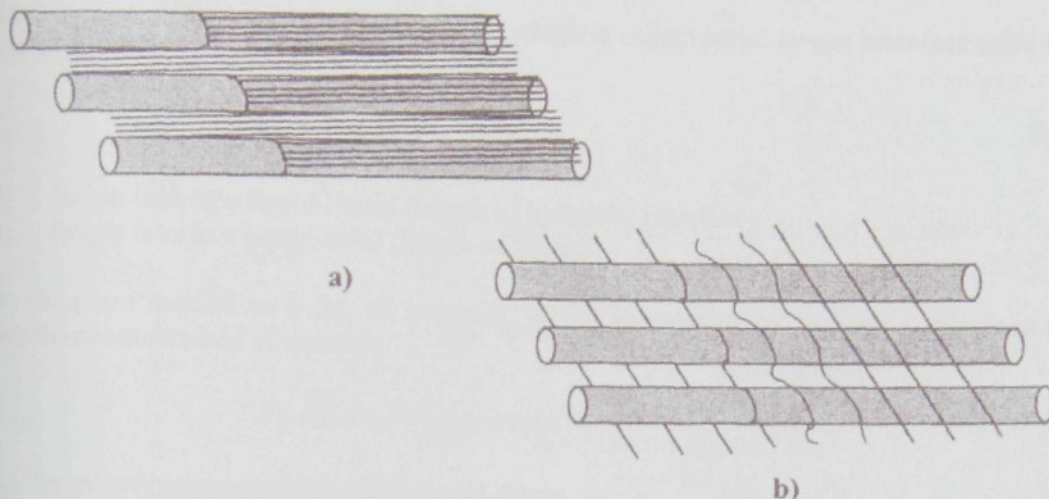


Fig. 5: The contact of liquid with a surface of fabric – evidently is wetting liquid in the contact not only with a fibres, but with inter-fibres ranges, which are in this case filling with liquid. On a fig. 5a) is illustrated current demonstration of liquid surface between fibres and on a fig. 5b) is illustrated the same situation demonstration by din of isoline, which connect a points with the same height.

Form of liquid surface between fibres is dependent on a factors line – exemplify may be factors affects inter-surfaces potentials (temperature, pressure, impurities, polarity...), other attribute of liquid (viscosity, vaporization of liquid...), properties of fibres (roughness of surface, finesses of fibres ...).

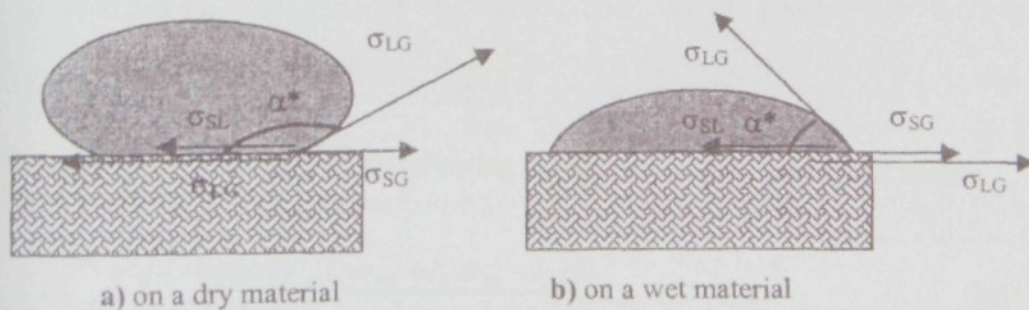


Fig. 6: Contact of fabric with a liquid – describe detail of inter-surface potentials, which is actuate in the surface of wetting fabric.

3. The physical analysis of contact angle on fabrics

This situation is from physical aspect expresses following equations:

In the point marked on a fig. 6a is power, which is endeavoured **lessen interface solid-liquid** circumscribed of equation:

$$F_1 = l_L \cdot \sigma_{LG} + l_S \cdot \sigma_{SG} \quad (2)$$

l_L ... length interface liquid-liquid (length of hydraulic interface)

l_S ... length interface liquid-solid (length of fibres)

In the point marked on a fig. 6a is power, which is endeavoured **heighten interface solid-liquid** circumscribed of equation:

$$F_2 = l_S \cdot \sigma_{SL} + l \cdot \sigma_{LG} \cdot \cos(\alpha^*) \quad (3)$$

l ... length of macroscopic interface liquid-fabric

α^* ... an apparent contact angle

From the last two equation is possible, after a hypothesis of equality F_1 and F_2 , convey an **apparent contact angle**:

$$\cos(\alpha^*) = \frac{l_L \cdot \sigma_{LG} + l_S \cdot \sigma_{SG} - l_S \cdot \sigma_{SL}}{l \cdot \sigma_{LG}} \quad (4)$$

For textiles surfaces – we consider a surface onto roughness, obtain:

$$l \leq l_S + l_L \quad (5)$$

For homogeneous surface (for example – smooth board) obtain following equation:

$$\cos(\alpha) = \frac{l \cdot \sigma_{SG} - l_S \cdot \sigma_{SL}}{l \cdot \sigma_{LG}} \quad (6)$$

From an equation (4) and (6) resulting following ratio between apparent and real contact angle **for dry fabric**:

$$\frac{\cos(\alpha^*)}{\cos(\alpha)} = \frac{l_L \cdot \sigma_{LG} + l_S \cdot \sigma_{SG} - l_S \cdot \sigma_{SL}}{l \cdot \sigma_{SG} - l_S \cdot \sigma_{SL}} \quad (7)$$

Analogical is possible to come to the ratio between an apparel and a real contact angle **for dry fabric**. Calculation is in this case foundation on iverse of course γ_{LG} on length l_L :

$$\frac{\cos(\alpha^*)}{\cos(\alpha)} = \frac{-l_L \cdot \sigma_{LG} + l_S \cdot \sigma_{SG} - l_S \cdot \sigma_{SL}}{l \cdot \sigma_{SG} - l_S \cdot \sigma_{SL}} \quad (8)$$

Calculation of parameters l_L and l_S is greatly complicated and it must be working with finesse of yarn, finesse of fibers, of formal factors of fibres. We are content with appraisal: $l_L=0,5.1$ and $l_S=1$. For this parameters and for water as tested liquid is possible to calculate an apparent contact angle on dry and wet fabric according to the equation (7) let us say (8).

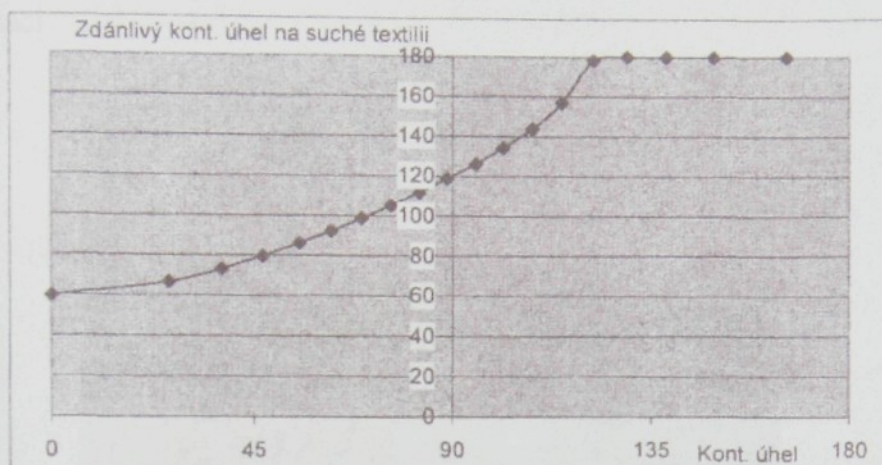


Fig.7: Dependence of apparent contact angle (contact angle liquid-fabric) on real contact angle (contact angle liquid-polymer) for dry fabrics. Values are in degrees and they were acquired by calculation according to the equation (8).

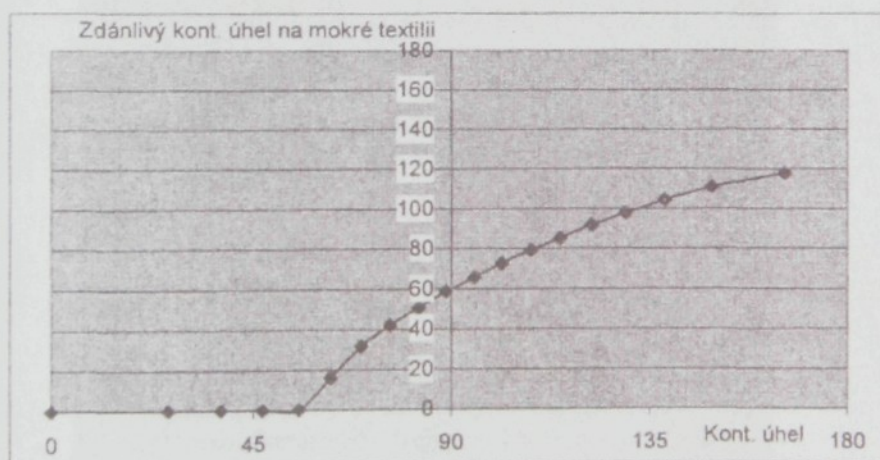


Fig.8: Dependence of apparent contact angle (contact angle liquid-fabric) on real contact angle (contact angle liquid-polymer) for instance already wetting fabric. Values are in degrees and they were acquired by calculation according to the equation (8).

In a typical case is fabric dry on beginning of experiment and at the end of experiments is wetting. In case on, that real contact angle is 60° , then apparent contact angle is 80° on beginning of experiments and at the end of experiments is 0° .

6. Acknowledgement

This study was supported by GAČR 104/03/P031 (Czech Republic)

[Příloha 4]

Autoři: WIENER, J., DEMBICKÝ, J.

Název: **Smáčení vláknenných povrchů**

Časopis: Fibres and Textile

přijato k publikaci



SMÁČENÍ VLÁKENNÝCH POVRCHŮ

Wiener J., Dembický J.

Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci, Hálkova 6, 461 17 Liberec, Česká republika

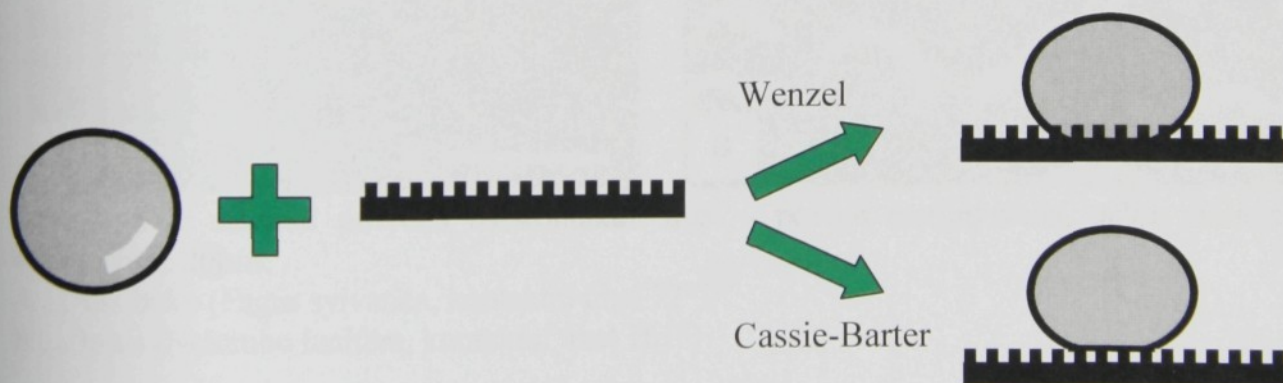
e-mail: josef.dembicky@vslib.cz; jakub.wiener@vslib.cz

ÚVOD

Při sledování smáčivosti textilních materiálů je třeba se zmínit o **zdánlivém kontaktním úhlu**. Zdánlivým je každý kontaktní úhel, jehož velikost souvisí s jinými parametry testovaného povrchu než jen s jeho chemickým složením. Základním důvodem zdánlivosti je komplikovaná geometrie povrchu a nehomogenita povrchu.

TEORIE

Při kontaktu kapaliny s členitým povrchem je výsledný kontaktní úhel mezi kapalinou, vzduchem a pevným povrchem dán strukturou povrchu pevné látky. Některé povrchy (obecně s menší členitostí povrchu) se chovají podle Wenzelova modelu (1), členitější povrchy s větší porozitou podle Cassie-Barterova modelu (2).



Obr. 1: Chování kapky na členitém povrchu – schematicky vyjádřený rozdíl mezi Wenzelovým a Cassie-Baxterovým modelem smáčivosti

Základem Wenzelova modelu [1] smáčivosti drsného povrchu je představa, že povrch je smočen kapalinou a kontaktní úhel je dán lokálním nakloněním povrchu v kontaktu s kapalinou. Wenzel navrhl model popisující zdánlivý kontaktní úhel na drsném povrchu jako:

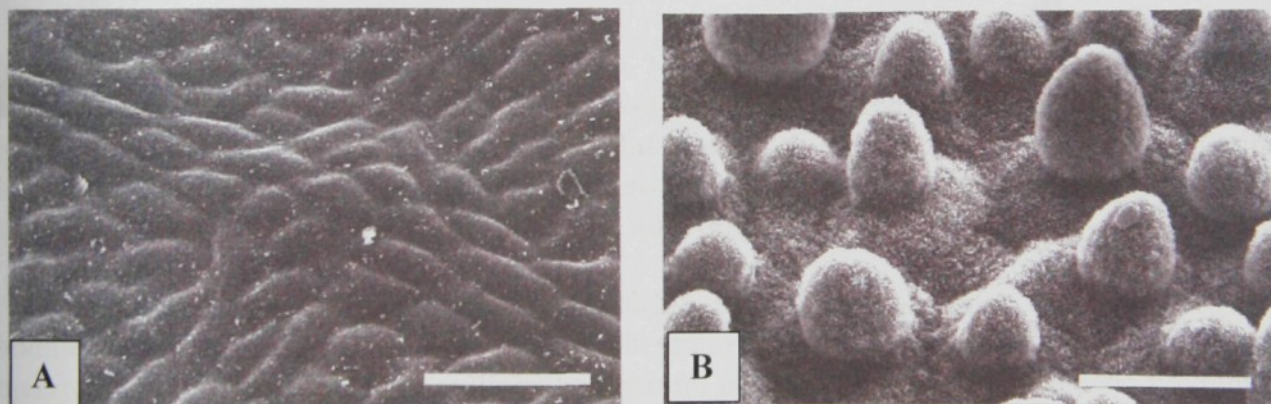
$$\cos(\alpha) = d \cdot \cos(\beta) \quad d = \frac{S_2}{S_1} \quad (1)$$

Kde d je faktor drsnosti definovaný jako poměr mikroskopické (skutečné) S_2 a makroskopické (geometrické) S_1 plochy povrchu. α je reálný (skutečný) kontaktní úhel na hladkém materiálu ustavený v souladu s Yangovou rovnicí. β je zdánlivý (makroskopický) kontaktní úhel. Faktor drsnosti povrchu je u reálných povrchů obvykle větší než jedna, pak dochází k zvýraznění základní vlastnosti povrchu. Vlivem nárůstu drsnosti se z hydrofobního povrchu stává povrch výrazně hydrofobnější a z hydrofilního výrazně hydrofilnější.

Cassie a Baxter [2] založili svůj model na představě substrátu, který není obecně kapalinou zcela smočen, ale mezi kapalinou a částmi pevného substrátu se může nacházet vzduchová vrstva. Kontaktní úhel je v místech styku se vzduchem roven 180° .

$$\cos(\alpha) = f_1 \cdot \cos(\beta) - f_2 \quad (2)$$

Podíl kontaktu kapaliny s pevným substrátem je označen jako f_1 . Podíl kontaktu kapaliny se vzduchem je označen jako f_2 . Cassie-Baxterův model je vhodný k popisu všech povrchů, ale jeho hlavní výhodou je možnost teoretické analýzy hydrofobních povrchů s vysokou drsností povrchu. Pomocí tohoto vztahu lze vysvětlit extrémní kontaktní úhly na členitých površích – např. povrch lotosu. Viz obr. 2.

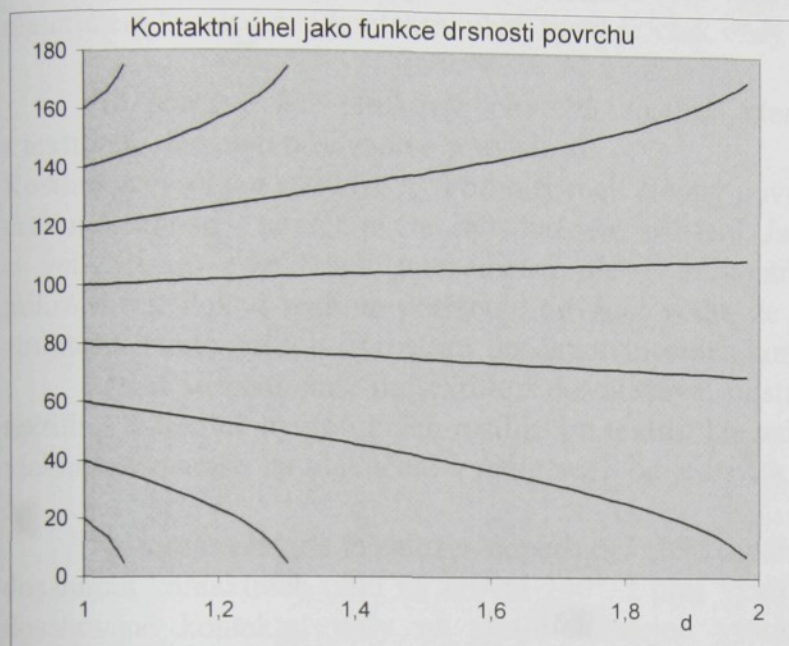


Obr. 2: Vliv drsnosti povrchu na kontaktní úhel – povrch rostliny/voda, délka měřítka v obrázku je $20\mu\text{m}$

A ... list buku (*Fagus sylvatica*, kontaktní úhel 72°)

B ... lotos (*Nelumbo lucifera*, kontaktní úhel 161°)

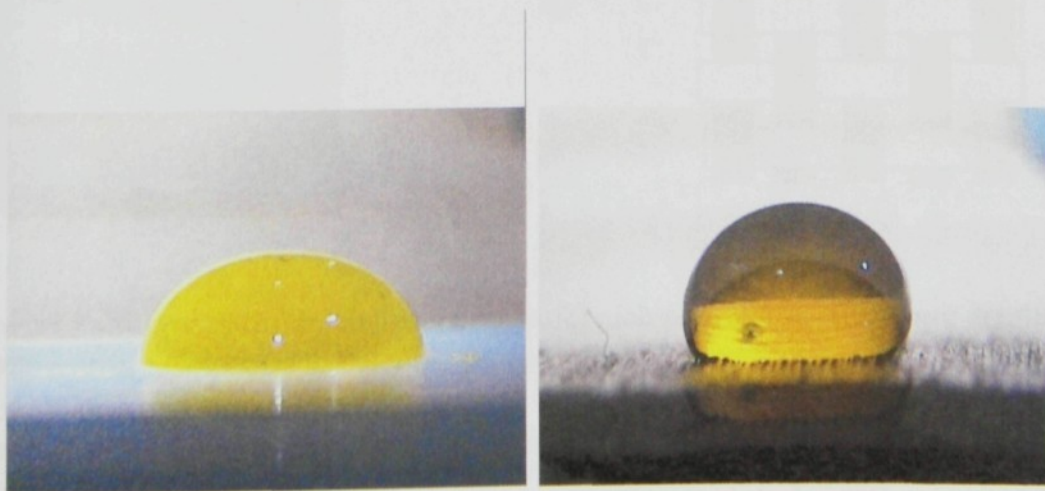
Vyšší členitost povrchu vede k výraznějšímu projevu dané vlastnosti: Pokud je hladký povrch smáčivý, bude po zdrsnění ještě smáčivější. Pokud je hladký povrch nesmáčivý, bude po zdrsnění ještě nesmáčivější. To je v souladu s následujícím obrázkem, kde je vynesena závislost zdánlivého kontaktního úhlu (α_D) na drsnosti povrchu (d) pro různé kontaktní úhly stanovené na hladkých materiálech (α_H). Výpočet byl proveden podle Wenzelovy rovnice.



Obr. 3: Změna zdánlivého kontaktního úhlu v závislosti na drsnosti povrchu, hladké čáry spojují body se stejným reálným kontaktním úhlem. Na vodorovné ose je vynesena drsnost (d , poměr reálné a zdánlivé plochy povrchu), na svislé ose je vynesena zdánlivý kontaktní úhel, data byla vypočtena pomocí rovnice (20)

U porézních nehomogenních struktur, jejichž příkladem jsou textilie, je situace komplikovanější než u homogenních substrátů. Na běžných plochých materiálech (např. sklo, plastická hmota apod.) je kontaktní úhel dán rovnováhou mezi-povrchových napětí. Kontaktní úhel na ideálně hladkém povrchu označíme jako reálný. Pokud je povrch testovaného materiálu drsný, pak je stanovený kontaktní úhel zdánlivý - není v souladu s chemickým složením povrchu a je závislý na míře drsnosti povrchu.

Kontaktní úhel zjištěný z makroskopických experimentů se může výrazně lišit od hodnoty stanovené výpočtem z fyzikálně chemických úvah. Základem „rozporu“ mezi makroskopickým (zdánlivým) a reálným kontaktním úhlem je geometrie smáčeného povrchu. V případě homogenních látek (např. deska z polypropylénu) popisuje vlastnosti povrchu jeho drsnost.



Obr. 4: Tvar přisedlé kapky na povrchu o stejném chemickém složení, ale o rozdílné struktuře: vlevo je hladký povrch (kontaktní úhel 90°), vpravo je členitý (povrch tvořený paralelními vlákny o průměru $20\mu\text{m}$ – zdánlivý kontaktní úhle 130°)

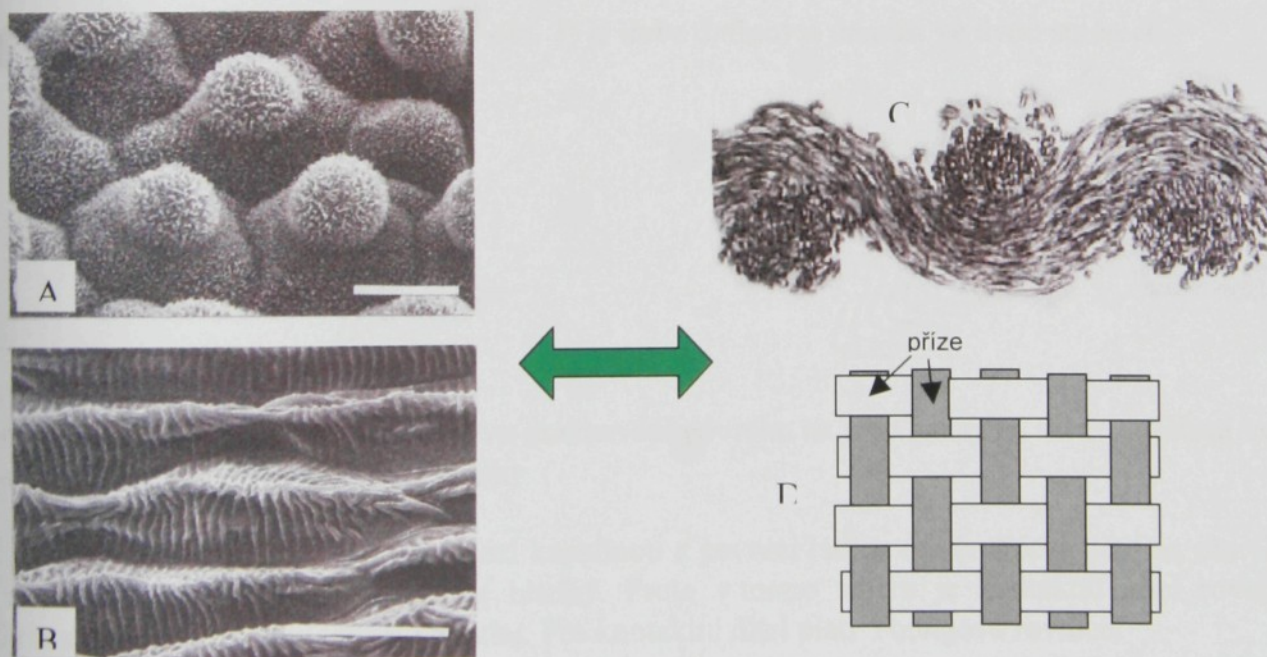
U porézních nehomogenních struktur, jejichž příkladem jsou textilie, je situace komplikovanější než u homogenních substrátů (viz výše). Při kontaktu kapaliny s textilním materiálem lze sledovat kontaktní úhel, který je však vždy nutné považovat za zdánlivý.

Při porovnávání struktury povrchů rostlin, které vykazují extrémní hydrofobitu s textiliemi, lze najít překvapivé souvislosti.

Rostliny s vysokým stupněm hydrofobity mají členitý povrch, ve kterém lze identifikovat více úrovní členitosti – povrch je členitý v každém zvětšení. Jsou zde téměř makroskopické útvary o velikostech v desítkách mikrometrů ale i mikrostruktury o rozměrech v desetínách mikrometru. Pokud rostlina potřebuje odvádět vodu, ze svého povrchu vytvoří anizotropní strukturu. Tímto způsobem rostliny dosáhnou mezních kontaktních úhlů s vodou okolo 160° .

Pokud se podíváme na textilie s dostatečným odstupem, uvědomíme si společné rysy textilií a extrémně hydrofobních rostlin. I u textilií lze nalézt několik úrovní členitosti (příze, vlákna, nerovnosti na vláknech) v rozměrech od jednotek až po stovky mikrometrů. Viz obr. 5.

Na tomto základě je založen odperlující efekt (hydrofobní úprava) textilií, kde můžeme dosáhnout kontaktních úhlů na úrovni 140° . I přes vyšší porozitu textilií nejsou tedy běžně dosahované kontaktní úhly na textiliích stejně vysoké, jako na některých rostlinách. Základním z důvodů je již zmíněný rozdíl v rozměru povrchových útvarů (na textiliích jsou řádově větší než na rostlinách) a s tím související nesteromnost povrchu.



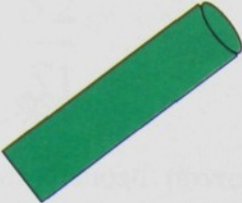
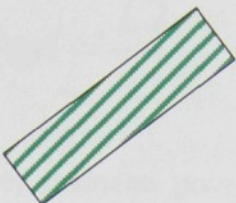
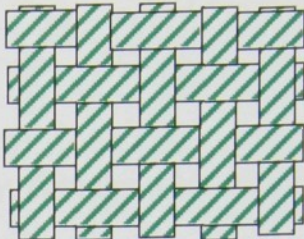
Obr. 5: Srovnání struktury přírodních vysoce hydrofobních povrchů se strukturou tkaniny

A ... povrch rostliny *Colocasia esculenta*, snímek z elektronového mikroskopu, měřítko má délku $20\ \mu\text{m}$, kontaktní úhel 160° (voda)

B ... povrch rostliny *Mutisia decurrens*, snímek z elektronového mikroskopu, měřítko má délku $20\ \mu\text{m}$, kontaktní úhel 160° (voda)

C ... řez běžnou tkaninou z bavlněných vláken

D ... schéma struktury tkaniny tvořené z přízí

			
	vlákno	příze	tkanina
hydrofilní	60°	20°	0°
hydrofobní	90°	120°	140°

Obr. 6: Schematické změny struktury textilie a příslušných kontaktních úhlů s vodou pro různé formy vláknenných útvarů – pro vlákno, přízi a tkaninu

Vliv drsnosti povrchu na kontaktní úhel lze obecně popsat Wenzelovou rovnicí [3], která platí pro neorientovanou drsnost povrchu. U textilií je povrch anizotropní z hlediska kontaktních úhlů. Nejjednodušším povrchem s podobnými vlastnostmi je povrch s rovnoběžnými rýhami v povrchu - viz Obr. 7.

Pro anizotropní povrchy (například obr. 7) je třeba definovat drsnost ve dvou směrech.



Obr. 7: Schematické znázornění vlivu drážkování povrchu na jeho smáčení, vlevo smáčení ve směru drážek, vpravo kolmo na drážky

Ve směru působení napětí mezi kapalinou a pevnou látkou (směr šipek) není na obr. 7 vlevo povrch drsný - je dokonale hladký. Proto v tomto směru je kontaktní úhel roven kontaktnímu úhlu na hladkém povrchu. Pro kontaktní úhel platí Youngova rovnice.

Na obrázku vpravo je ve směru působení napětí mezi kapalinou a pevnou látkou (směr šipek) povrch členitý. Pro kontaktní úhel platí Wenzelova rovnice. Dle Wenzelovy rovnice je v tomto směru kontaktní úhel extrémnější než u hladkého povrchu. Pokud je například hladký povrch nesmáčivý, pak je v tomto směru tento povrch extrémně nesmáčivý.

Na tomto základě je třeba zobecnit koeficient drsnosti podle následujícího schématu – rovnice (3). Drsnost nemusí být definována pouze jako poměr plochy reálné a makroskopické, ale může být definován i jako poměr délek mezifází – reálného a makroskopického.

$$d = \frac{S2}{S1} \quad \longrightarrow \quad d = \frac{L2}{L1}$$

(3)

d ... koeficient drsnosti povrchu, poměr reálného povrchu plochy povrchu vůči zdánlivé (makroskopické) ploše povrchu

S1 ... plocha mezifází reálného

S2 ... plocha mezifází makroskopického

L1 ... reálná délka mezifází ve směru působení povrchového napětí

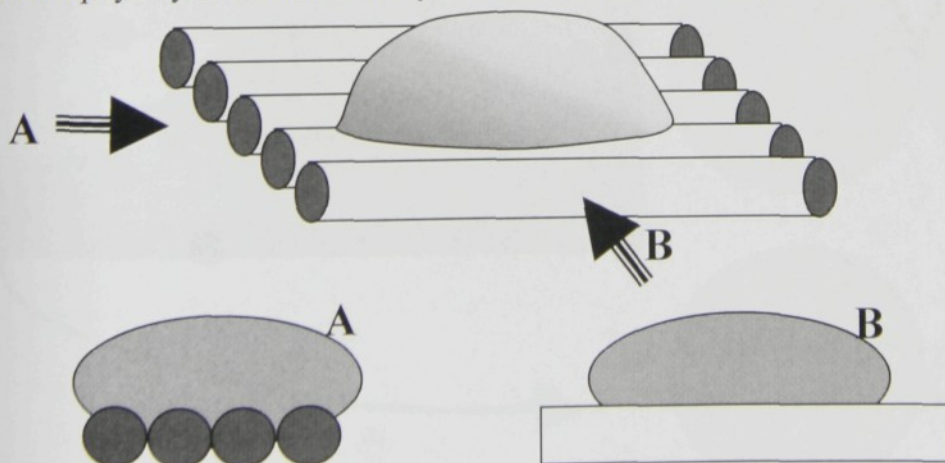
L2 ... makroskopická délka mezifází ve směru působení povrchového napětí

Povrch tvořený paralelními vlákny je blíže textilií nežli povrch tvořený drážkami. Sledování vlivu vzdálenosti a orientace vláken v povrchu bylo provedeno na povrchu tvořeném paralelně uspořádanými vlákny. Tato struktura je matematicky lépe definovatelná a analyzovatelná než běžná tkanina, ale stále zde platí stejné zákonitosti – struktura je definovaně uspořádaná a je tvořena textilními vlákny. Vzniklá modelová struktura má výraznou anizotropii, která je zřejmá z obr 8.

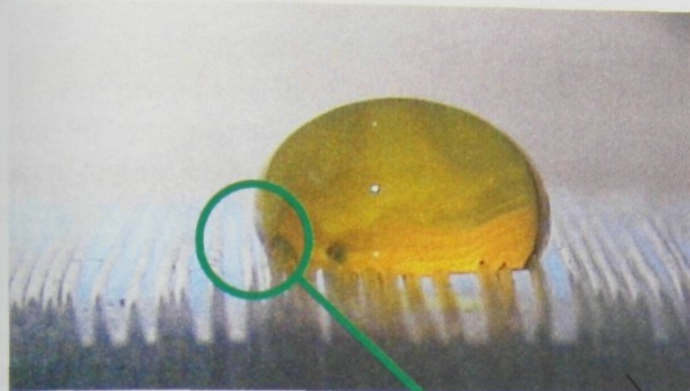
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentálně byl povrch realizován navinutím vrstvy vláken paralelně v těsném kontaktu na pevnou podložku tak, aby se vlákna nekřížila a byla vzájemně rovnoběžná. K navíjení vrstvy bylo použito speciální zařízení, které umožnilo měnit stoupání náviny a počet vrstev vláken. Vlákna byla z důvodu praktičnosti použita v podobě monofilu o vyšším průměru, resp. multifilu v případě velmi jemných vláken. Průměr použitých vláken byl v rozmezí od 10 do 500 μm . Povrch vzniklé struktury byl hydrofobizován tenkou hydrofobní vrstvou na bázi perflouralkánu.

Na testovaný povrch byla nanесena kapka o objemu 20 μl (20 mm^3) pomocí mikropipety. Kapka byla snímána ze dvou směrů - viz následující schéma. Následně byla k již sedící kapce přidána kapka a opět byla kapka sejmuta z obou směrů. Takto byl objem přisedlé kapky zvyšován dokud nebylo dosaženo objemu 100 μl .



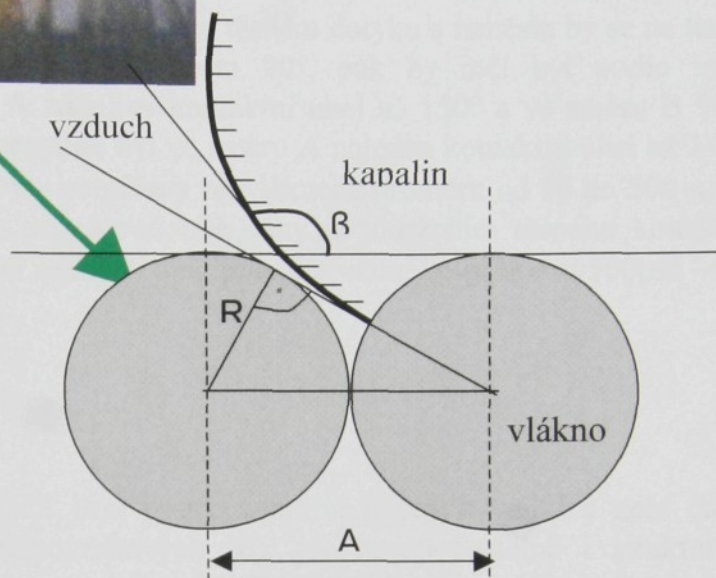
Obr. 8: Schematické znázornění neizotropního povrchu tvořeného paralelními vlákny v těsném kontaktu, schematicky jsou znázorněny i směry pozorování (označené A a B) a příslušné profily kapek v daných směrech



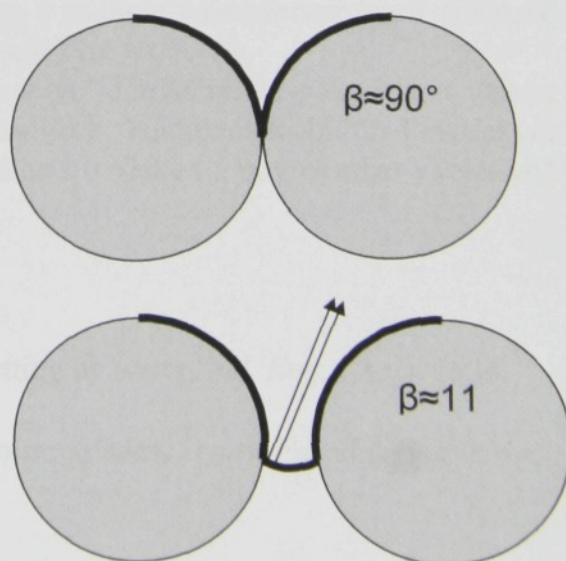
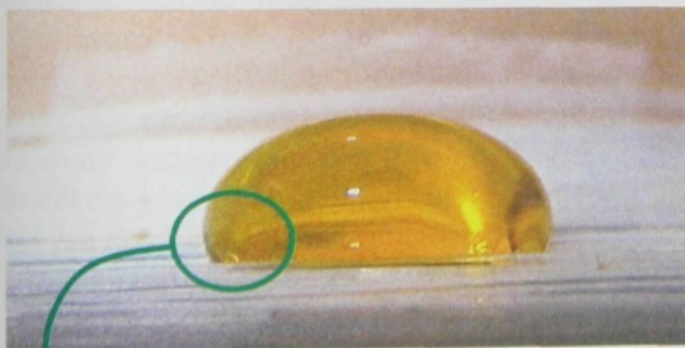
Obr. 9: Neizotropní povrchu tvořený paralelními vlákny o průměru $500\mu\text{m}$ – pozorování ve směru A, fotografie a základ fyzikální analýzy zdánlivého kontaktního úhlu

$$\sin(\beta_{MAX}) = \frac{R}{A \equiv 2R} = \frac{1}{2}$$

$$\beta_{MAX} = 150^\circ$$



Pro případ těsného kontaktu vláken je zdánlivý kontaktní úhel ve směru pozorování A až 150° pro případ, že reálný kontaktní úhel je 90° a přisedlá kapka je alespoň řádově většího rozměru než průměr vlákna. S rostoucí vzdáleností sousedních vláken roste i maximální hodnota zdánlivého kontaktního úhlu – teoreticky až k 180° . Pokud ovšem vlákna budou příliš vzdálena, pak se na nich kapalina neudrží – steče z vláken.



Obr. 10: Neizotropní povrchu tvořený paralelními vlákny o průměru $500\mu\text{m}$ – pozorování ve směru B, fotografie (vlákna o průměru $500\mu\text{m}$) a základ fyzikální analýzy zdánlivého kontaktního úhlu

Pro případ těsného kontaktu vláken je zdánlivý kontaktní úhel ve směru pozorování B roven 90° pro případ, že reálný kontaktní úhel je 90° . S rostoucí vzdáleností sousedních vláken roste i hodnota zdánlivého kontaktního úhlu – teoreticky až k 180° . Pokud ovšem vlákna budou příliš vzdálena, pak se na nich kapalina neudrží – steče z vláken.

Pokud by tedy byla vytvořena soustava vláken v těsném dotyku a nanasla by se na tento povrch kapka kapaliny s reálným kontaktním úhlem 90° , pak by měl být podle výše uvedených úvah pozorován ve směru A zdánlivý kontaktní úhel až 150° a ve směru B 90° . Tento povrch byl realizován a experimentálně byl ve směru A nalezen kontaktní úhel až 140° a ve směru B asi 110° . Tyto hodnoty byly naměřeny na vláknech průměru od 10 do 500 μm . Odchytky experimentu od teorie jsou pravděpodobně dány nedodržením těsného kontaktu sousedních vláken – problémy přinášela zejména manipulace s vlákny o průměru 500 μm – viz obr. 10.

ZÁVĚR

Kontaktní úhly mezi kapalinou a textilií jsou pouze zdánlivé – jejich velikost není dána Youngovou rovnicí (rovnováhou mezipovrchových sil), ale nezanedbatelně i strukturou povrchu textilie. V práci byla velká pozornost věnována členitosti povrchu vlákenného útvaru a jejímu vlivu na kontaktní úhel textilie–kapalina-vzduch. Popis geometrie povrchu reálné textilie není k dispozici s ohledem na extrémně komplikovanou strukturu textilie a její nestejnoměrnost. Problém reálné textilie byl řešen na zjednodušeném, ale fyzikálně velmi blízkém modelu struktury tvořené těsně uspořádanými paralelními vlákny – viz obr. 10. Tento povrch je blízký textilií v mnoha ohledech: zachovává si porozitu reálné textilie, vlákna jsou součástí uspořádané struktury a vzniklá struktura je výrazně anizotropní. Takto definovaný povrch je možné i relativně snadno realizovat a experimentálně ověřit jeho chování. Experimentálně bylo zjištěno, že kontaktní úhly jsou v souladu s navrženou teorií směrově závislé a jejich velikost je v souladu s navrženým teoretickým modelem.

Teoreticky zajímavým důsledkem těchto pokusů a analýz je zjištění, že pokud jsou vlákna vzájemně vzdálenější, pak lze dosáhnout extrémnějších kontaktních úhlů. Praktickým důsledkem je zjištění, že mechanickou změnou vzdálenosti vláken v povrchu lze v relativně širokých mezích měnit hydrofobitu textilie.

[1] Wenzel, R. N., Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Ind. Eng. Chem.* 1936, 28, 988.

[2] Cassie A. B. D., and Baxter, S. Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday Soc.* 1944, 3, 16.

[3] Wenzel, R.N.: *Ind. Eng. Chem.*, 1936, 2, 988

[Příloha 5]

Autoři: WIENER, J., DEMBICKÝ, J.

Název: **Vliv stavu pórů na smáčivost plošné textilie**

Časopis: Fibres and Textile

Zasláno do redakce



VLIV STAVU PÓRŮ NA SMÁČIVOST PLOŠNÉ TEXTILIE

Wiener J., Dembický J.

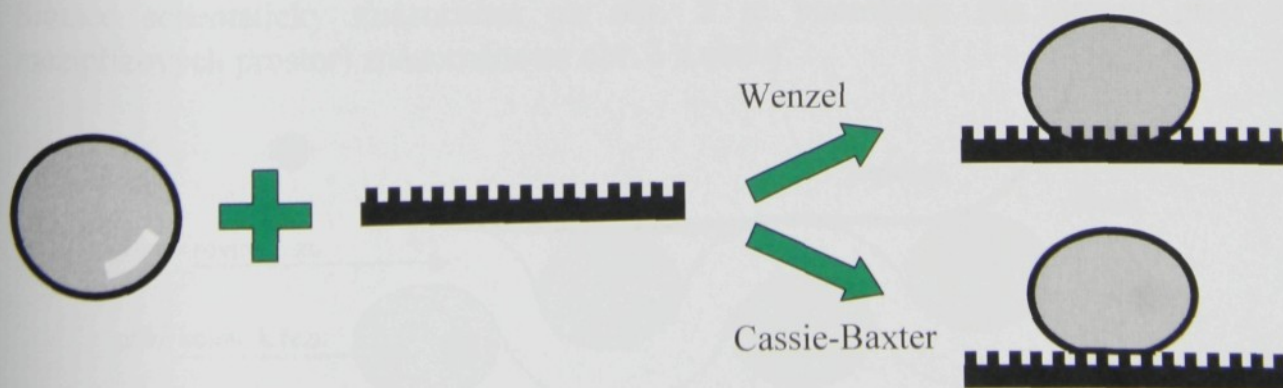
Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci, Hálkova 6, 461 17 Liberec, Česká republika

Práce je zaměřena na kontaktní úhel mezi kapalinou a plošnou textilií. Kontaktní úhel stanovený na textilií je nutně zdánlivý. Hodnota tohoto kontaktního úhlu závisí nejen na vlastnostech použitých vláken, ale i na jejich nadvláknenné struktuře a stavu mezivláknenných pórů. Suché póry brání smočení textilie. Póry vyplněné kapalinou smočení povrchu výrazně podporují. Vliv stavu pórů na smáčivost textilie je v této práci teoreticky analyzován. Na základě získaných rovnic lze pochopit a predikovat chování reálných textilií.

ÚVOD

U poréznych nehomogenních struktur, jejichž příkladem jsou textilie, je situace komplikovanější než u homogenních substrátů. Na běžných plochých materiálech (např. sklo, plastická hmota apod.) je kontaktní úhel dán rovnováhou mezipovrchových napětí. Kontaktní úhel zjištěný z makroskopických experimentů se může výrazně lišit od hodnoty stanovené výpočtem z fyzikálně chemických úvah. Základem „rozporu“ mezi makroskopickým (zdánlivým) a reálným kontaktním úhlem je geometrie smáčeného povrchu. Zdánlivým je každý kontaktní úhel, jehož velikost souvisí s jinými parametry testovaného povrchu než jen s jeho chemickým složením. Základním důvodem zdánlivosti je komplikovaná geometrie povrchu a porozita povrchu. V případě pevných látek popisuje vlastnosti povrchu jeho drsnost a porozita. Při sledování smáčivosti textilních materiálů stanovujeme na plošných textiliích pouze **zdánlivé kontaktní úhly**.

Při kontaktu kapaliny s členitým povrchem je výsledný kontaktní úhel mezi kapalinou vzduchem a pevným povrchem dán strukturou povrchu pevné látky. Některé povrchy (obecně s menší členitostí povrchu) se chovají podle Wenzelova modelu, členitější povrchy s větší porozitou podle Cassie-Baxterova modelu.



Obr. 1: Chování kapky na členitém povrchu – schematický rozdíl mezi Wenzelovým a Cassie-Baxterovým modelem smáčivosti

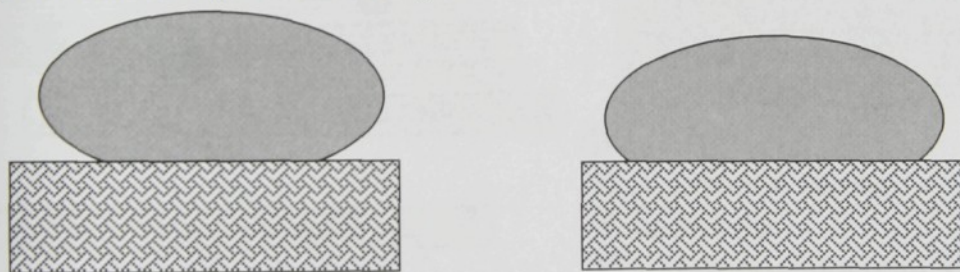
Pro účely této studie (sledování vlivu stavu pórů na smáčivost textilie) je použitelný pouze Cassie-Baxterův model pracující s existencí pórů. Cassie a Baxter [1] založili svůj model na představě substrátu, který není obecně kapalinou zcela smočen, ale mezi kapalinou a částmi pevného substrátu se může nacházet vzduchová vrstva. Kontaktní úhel je v místech styku se vzduchem roven 180° .

$$\cos(\alpha) = f_1 \cdot \cos(\beta) - f_2 \quad (1)$$

Podíl kontaktu kapaliny s pevným substrátem je označen jako f_1 . Podíl kontaktu kapaliny se vzduchem je označen jako f_2 . Cassie-Barterův model je vhodný k popisu všech povrchů, ale jeho hlavní výhodou je možnost teoretické analýzy hydrofobních povrchů s vysokou drsností povrchu. Pomocí tohoto vztahu lze vysvětlit extrémní kontaktní úhly na členitých površích – např. povrch lotosu. Viz obr. 1.

Když se kapalina dostane do kontaktu s textilií, ustaví se kontaktní úhel podle toho, zda je textilie „suchá“ či „mokrá“. „Mokrá“ textilie má mezivláknenné a mezipřízové prostory vyplněné kapalinou.

Kontaktní uhel mezi kapalinou a textilií je dán nejen členitostí jejího povrchu, ale i stavem mezivláknenných pórů (póry mohou být vyplněny vzduchem nebo kapalinou). Když se kapalina dostane do kontaktu s textilií, vytvoří se kontaktní úhel v závislosti na tom, zda je textilie suchá nebo mokrá. Rozdíl lze vysvětlit odlišnou orientací mezipovrchové síly kapalina - vzduch pod přisedlou kapkou. Rozdíl je patrný z následujících obrázků (obr.2 a obr. 3).

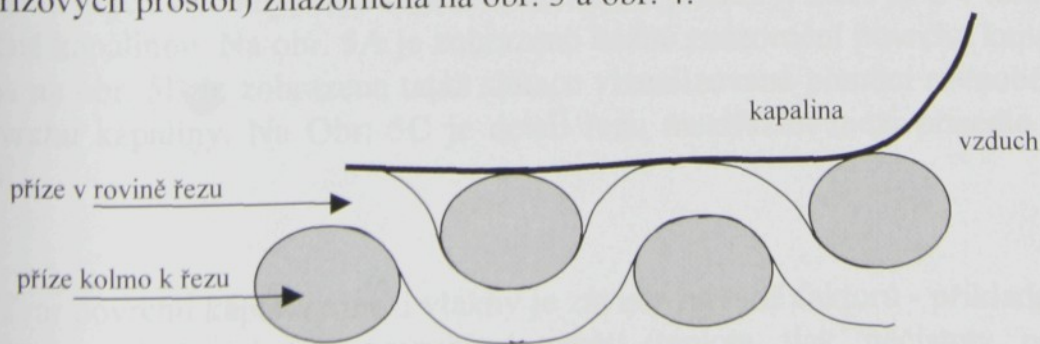


Obr. 2: a) Na materiálu suchém

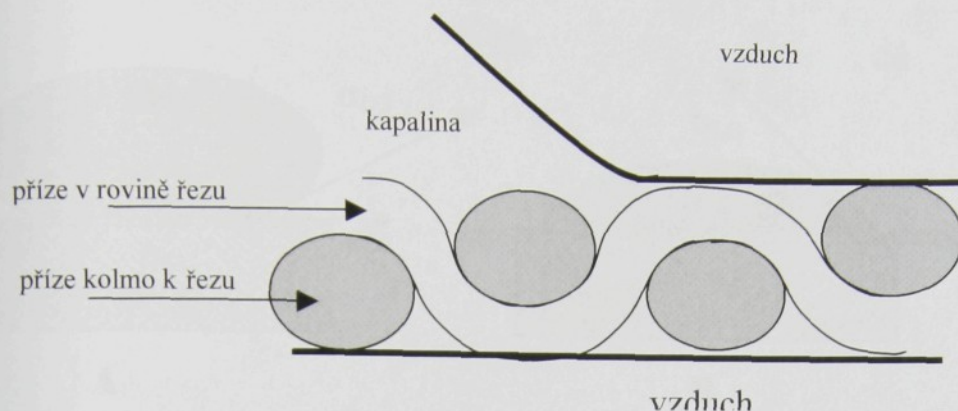
b) Na materiálu mokrém

Poznámka: Situace je komplikována i chlupatostí povrchu textilie, která bude komplikovaně deformována působením hmotnosti přisedlé kapky.

Situace schematicky znázorněná na obr. 2 je podrobněji (na úrovni přízi a mezipřízových prostor) znázorněna na obr. 3 a obr. 4.

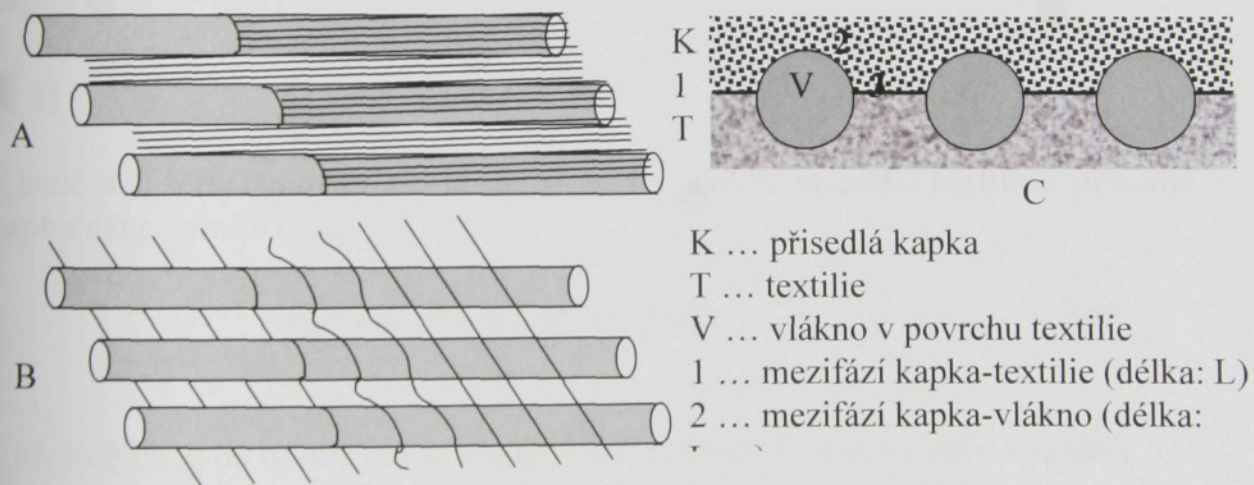


Obr. 3: Detail kontaktu kapaliny se suchým substrátem – odpovídá situaci na obrázku 2a)



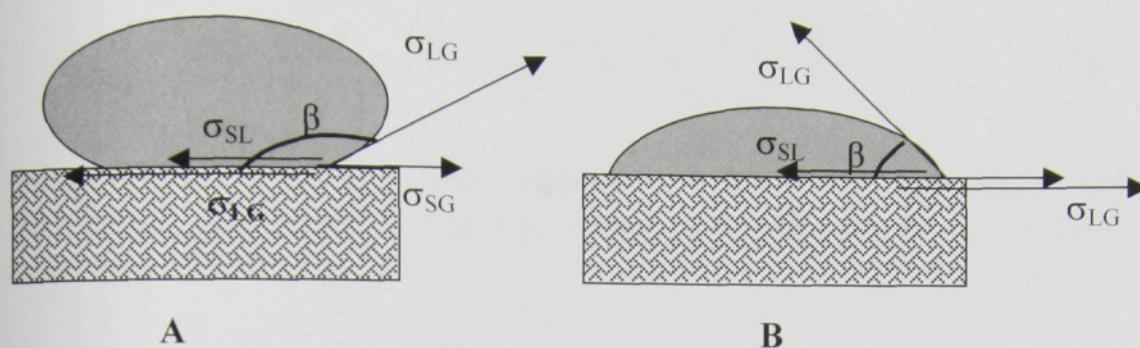
Obr. 4: Detail kontaktu kapaliny se smočeným substrátem – odpovídá situaci na obrázku 2b)

Situace kapaliny na povrchu smočené textilie na úrovni vláken a mezivláknenných prostor je znázorněná na následujícím obr. 5.



Obr. 5: Kontakt kapaliny s povrchem textilie – je patrné, že smáčející kapalina je v kontaktu nejen s vlákny, ale i s mezi-vláknennými prostory, které jsou v tomto případě vyplněné kapalinou. Na obr. 5A je zobrazeno běžné znázornění povrchu kapaliny mezi vlákny, na obr. 5B je zobrazena tatáž situace vizualizovaná pomocí rovnoběžných čar na povrchu kapaliny. Na Obr. 5C je detail řezu mezifázím mezi přisedlou kapkou a textilií

Tvar povrchu kapaliny mezi vlákny je závislý na řadě faktorů - příkladem mohou být faktory ovlivňující mezi-povrchová napětí (teplota, tlak, nečistoty, polarita...), ostatní vlastnosti kapaliny (viskozita, odpařování kapaliny...), vlastnosti vláken (členitost povrchu, jemnost vláken ...).



Obr. 6: Kontakt textilie s kapalinou – detail rozkreslení mezi-povrchových napětí působících v povrchu smáčené textilie, která je již kapalinou nasycena. Obloukem je znázorněn zdánlivý kontaktní úhel β pro suchou textili (A) i pro textili s mezivláknennou kapalinou (B).

Z fyzikálního hlediska je tato situace vyjádřena následujícími rovnicemi:

V bodě sledovaném na obr. 6B je síla snažící se **zmenšit mezifázi textilie – přisedlá kapka** dána rovnicí (2).

$$F_1 = L_{KP} \cdot \sigma_{LG} + L_{KV} \cdot \sigma_{SG} \quad (2)$$

V bodě sledovaném na obr. 6B je síla snažící se **zvětšit mezifázi textilie – přisedlá kapka** dána rovnicí (3).

$$F_2 = L_{KV} \cdot \sigma_{SL} + L \cdot \sigma_{LG} \cdot \cos(\beta) \quad (3)$$

Z předešlých dvou rovnic lze za předpokladu rovnosti F_1 a F_2 vyjádřit **zdánlivý kontaktní úhel** β (4).

$$\cos(\beta) = \frac{L_{KP} \cdot \sigma_{LG} + L_{KV} \cdot \sigma_{SG} - L_{KV} \cdot \sigma_{SL}}{L \cdot \sigma_{LG}} \quad (4)$$

Pro textilní povrchy je třeba uvažovat povrch za členitý, platí (viz obr. 5C) rovnice (5).

$$L \leq L_{KV} + L_{KP} \quad (5)$$

Jak vyplývá z předešlých kapitol pro běžný povrch (např. hladkou desku) platí následující rovnice(6).

$$\cos(\alpha) = \frac{L \cdot \sigma_{SG} - L \cdot \sigma_{SL}}{L \cdot \sigma_{LG}} \quad (6)$$

Z toho vyplývá pro vztah mezi zdánlivým a skutečným kontaktním úhlem na textilií s kapalinou mezi vlákny následující vztah (7).

$$\frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} = \frac{L_{KP} \cdot \sigma_{LG} + L_{KV} \cdot \sigma_{SG} - L_{KV} \cdot \sigma_{SL}}{L \cdot \sigma_{SG} - L \cdot \sigma_{SL}} \quad (7)$$

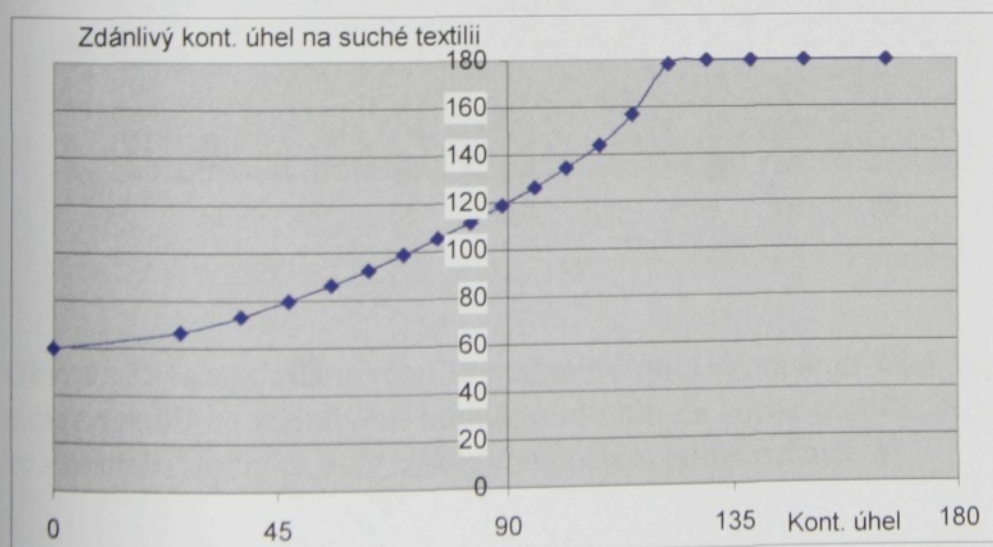
Obdobně lze dospět k vztahu mezi zdánlivým a skutečným kontaktním úhlem pro suchou textilií (Obr. 6A). Výpočet je v tomto případě založen na opačném směru působení σ_{LG} na délce L_{KP} .

$$\frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} = \frac{-L_{KP} \cdot \sigma_{LG} + L_{KV} \cdot \sigma_{SG} - L_{KV} \cdot \sigma_{SL}}{L \cdot \sigma_{SG} - L \cdot \sigma_{SL}} \quad (8)$$

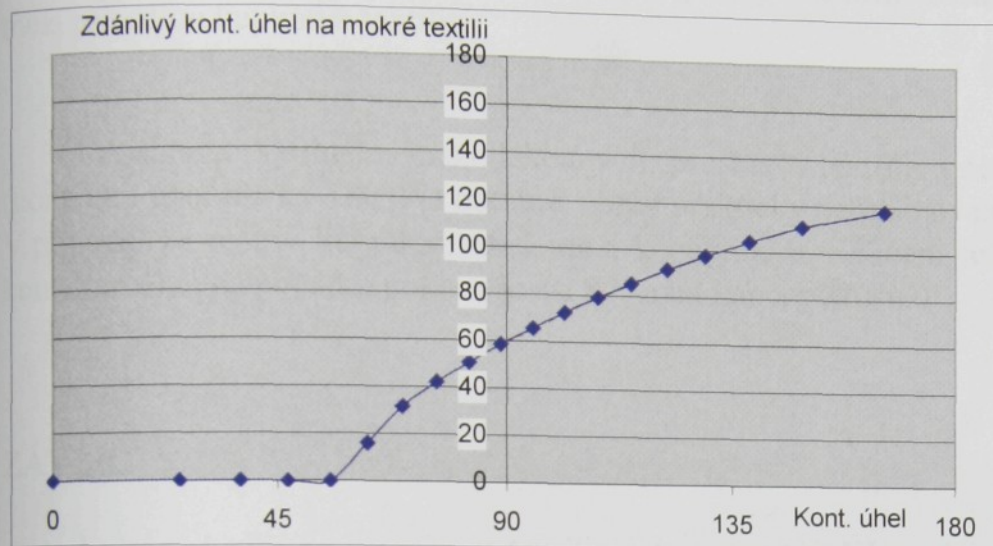
Výpočet hodnot L_{KP} a L_{KV} je značně komplikovaný a musel by pracovat s jemnostmi příze, jemnostmi vláken, tvarovými faktory vláken. Zde se spokojíme s odhadem: $L_{KP}=0,5.L$ a $L_{KV}=L$. Pro tyto hodnoty a pro vodu jako testační kapalinu lze vypočítat zdánlivý kontaktní úhel na suché a na mokré textilií podle vzorce (7) resp. (8).

Výše uvedené fyzikální úvahy lze chápat i jako teoretické rozšíření Cassie-Barterova modelu smáčivosti povrchu. V klasickém tvaru Cassie-Baxterova modelu by nově navržený vztah pro textilie bylo možné zjednodušeně vyjádřit jako (9).

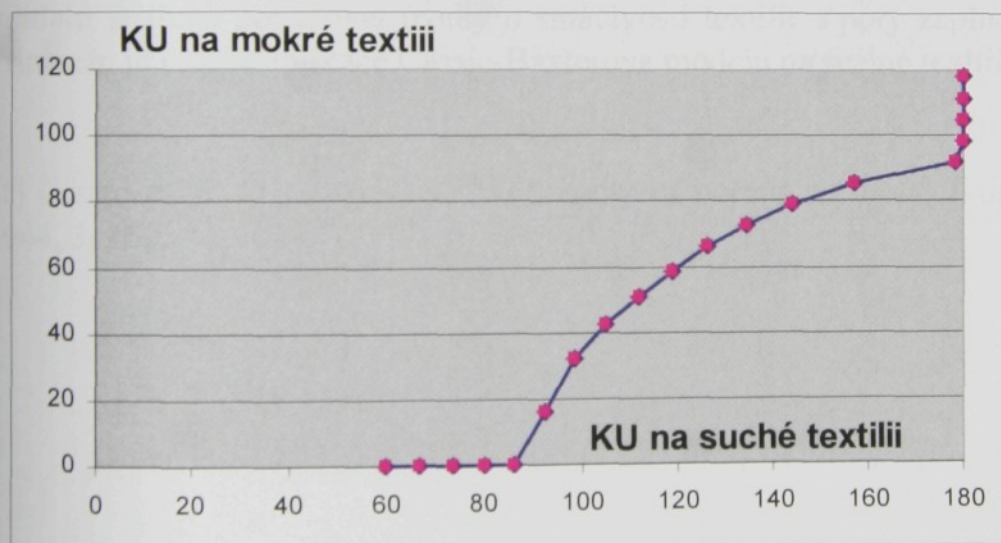
$$\cos(\alpha) = f_1 \cdot \cos(\beta) \pm f_2 \quad (9)$$



Obr. 7: Závislost zdánlivého kontaktního úhlu (kontaktní úhel kapalina - textilie) na reálném kontaktním úhlu (kontaktní úhel kapalina-polymer) pro případ suché textilie. Hodnoty jsou uvedeny ve stupních. Hodnoty byly získány výpočtem podle rovnice 8



Obr. 8: Závislost zdánlivého kontaktního úhlu (kontaktní úhel kapalina - textilie) na reálném kontaktním úhlu (kontaktní úhel kapalina-polymer) pro případ již smočené textilie. Hodnoty jsou uvedeny ve stupních. Hodnoty byly získány výpočtem podle rovnice 8



Obr. 9: Závislost zdánlivého kontaktního úhlu (kontaktní úhel kapalina - textilie) na mokré textílii na zdánlivém kontaktním úhlu na suché textílii.. Hodnoty jsou uvedeny ve stupních. Hodnoty byly získány výpočtem podle rovnice 8

Výsledky vypočtené podle rovnice (7) a (8) jsou v principiálním souhlasu s dosavadními pokusy.

Na reálných textíliích je situace dále komplikována různými stupni smočení textilie. V typickém případě je na počátku pokusu textilie suchá a na konci pokusu je

saturována kapalinou. S různým množstvím kapaliny v textilií se mění i délky mezifází mezi přisedlou kapkou a textilií.

Dosáhnout vyplnění mezivláknenných prostor v textilií z nesmáčivých vláken (kontaktní úhel blízký 180°) je obtížné, téměř prakticky nerealizovatelné. V případě, že reálný kontaktní úhel mezi kapalinou a vláknem je 60° , pak zdánlivý kontaktní úhel na počátku pokusu je asi 80° a na konci pokusu 0° .

ZÁVĚR

Extrémní vliv na smáčivost textilie má stav mezivláknenných pórů. Při smáčení nehraje hlavní roli tvar, velikost či distribuce pórů v textilií, ale jejich obsah. Pokud jsou póry zaplněny vzduchem je povrch nesmáčivý, pokud jsou póry zaplněny vodou je povrch vysoce smáčivý. Toto experimentální pozorování je teoreticky analyzováno a vysvětleno.

Úvahy a výpočty kontaktních úhlů na textilií s nesmočenými póry jsou v souladu s Cassie-Baxterovým modelem smáčivosti povrchu. Za **rozšíření Cassie-Baxterova modelu** je třeba považovat úvahy o smáčivosti textilie s póry zaplněnými kapalinou. Přínosem je i sama aplikace Cassie-Baxterova modelu na reálné textilie.

[1] Cassie A. B. D., Baxter, S.: Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday Soc.* 1944, 3, 16.

[Příloha 6]

Autor: WIENER, J.

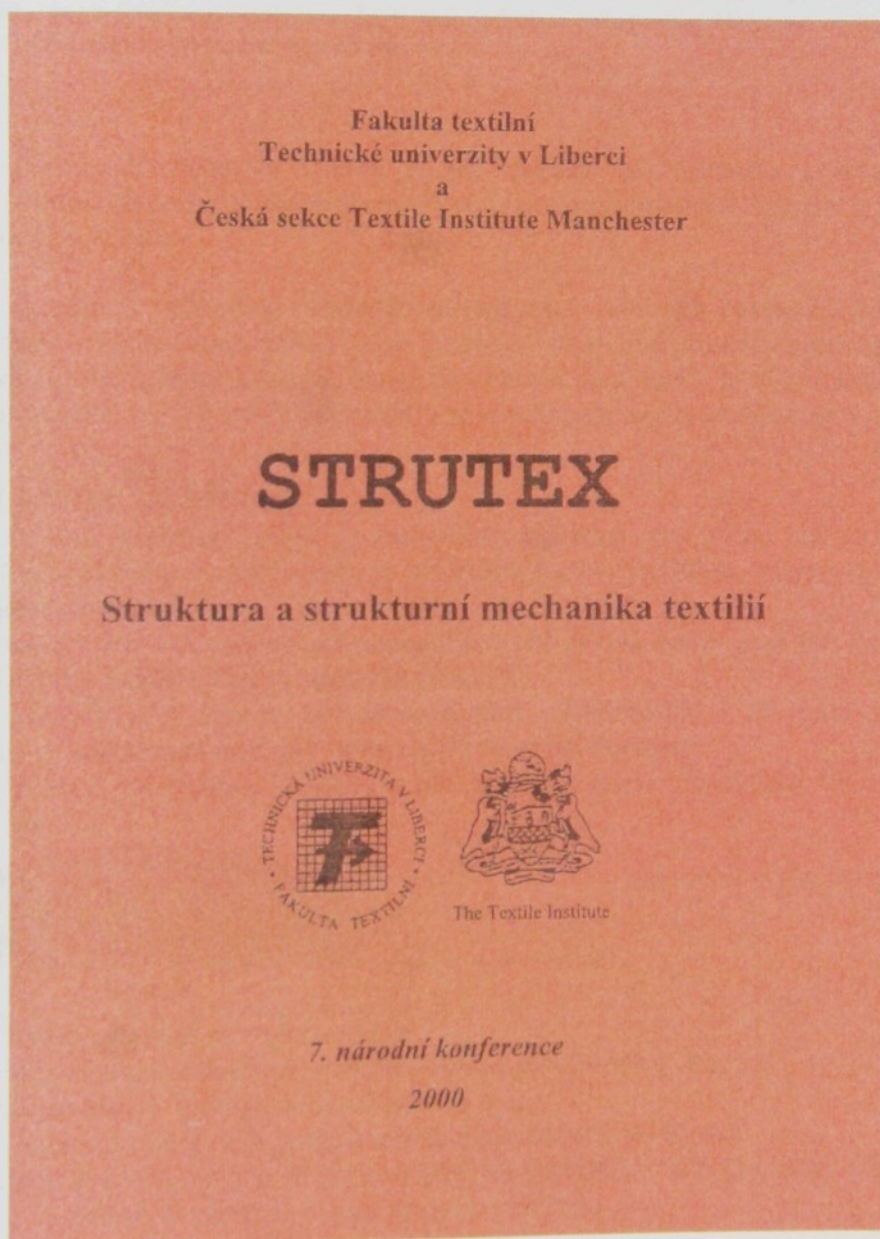
Název: **Vzlínání kapaliny ve svazku vláken**

Konference: 7. National conference Strutex

Konaná: 29. - 30. listopad 2000, Liberec

Stránka: 69-76

ISBN 80-7083-442-0



STRUTEX

7. národní konference

TU v Liberci, listopad 2000

VZLINÁNÍ KAPALINY VE SVAZKU VLÁKEN

Jakub Wiener¹

Abstrakt:

Autor navrhl nový komplexní model umožňující popsat vzlinání kapaliny ve svazku vláken. Rovnovážný tvar hladinové plochy je rozdělen na tři dílčí jevy, které jsou podrobně diskutovány. Navržené postupy lze použít k predikci sací výšky a ostatních parametrů vzlinání.

Úvod:

Jednou ze důležitých vlastností textilie je její chování při kontaktu s vodou (obecně kapalinou) - dochází k řadě fyzikálně-chemických jevů (např. bobtnání, vzlinání a zadržování kapaliny textilním útvarem...).

Tato práce se zabývá vzlináním, které do značné míry ovlivňuje spotřebitelské vlastnosti textilie. Pokud v textilií voda vzliná - lze ji použít např. pro odvod kapalného potu od pokožky, pro výrobu ručníků a utěrek, knotů do svíček a lamp na lih či olej, textilií určených k úklidovým pracem, nebo k některým moderním nehořlavým úpravám bytových textilií¹...

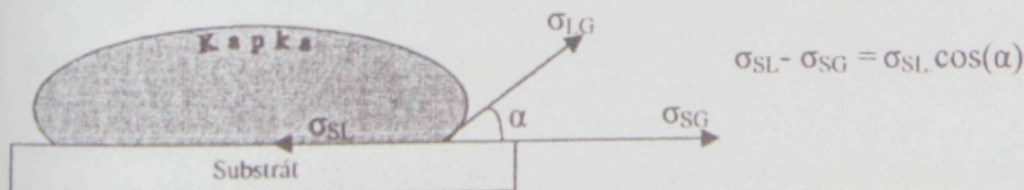
Základy teorie smáčení

Pro většinu textilních vláken je energeticky výhodné, aby jejich povrch byl pokryt kapalinou. Makroskopickým důsledkem je vzlinání kapaliny textilním útvarem a zadržování kapaliny v jeho struktuře.

Vzlinavost není ovlivněna vnitřní strukturou vlákna, ale pouze jeho povrchem - velký vliv mají aviváže a finální úpravy (nejen chemické!).

Poznámka: Vzlinavost je vysoce závislá na kvalitě odšlichtování - na tomto principu je založen jeden ze základních testů pro hodnocení stupně odšlichtování.

Vliv kvality povrchu na smáčení kapaliny je možné popsat pomocí smáčecího úhlu².



Obrázek 1: Napětí působící na rozhraní fází

Mezi kapalinou a substrátem (pevnou látkou) působí napětí σ_{LS}

Mezi kapalinou a vzduchem působí napětí σ_{LG}

Mezi substrátem (pevnou látkou) a vzduchem působí napětí σ_{SG}

Úhel α je dán rovnováhou sil (resp. napětí) na kontaktu tří fází (S-pevná látka, L-kapalina, G-plyn) ve směru povrchu substrátu

¹ Ing. Jakub Wiener, Katedra textilního zušlechťování, TU Liberec, Hájkova 6, 461 17

Významným faktorem ovlivňujícím vzlinavost je i jemnost vláken (závisí na ní měrný povrch textilie) a zaplnění textilního útvaru vlákny (kolik je v textilií dutin a jak jsou distribuovány). Měrný povrch textilie závisí i na průřezu vlákna (resp. tvarovém faktoru³) - vlákna nekruhového průřezu mají povrch výrazně větší.

Křivosti povrchu jsou adekvátní hydrostatickému tlaku v kapalině. Vnitřní tlak pod volnou hladinou kapaliny dán Laplaceovou rovnicí⁴:

$$P = \sigma_{LG} \times \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

P ... relativní tlak [Pa]

σ_{LG} ... povrchové napětí mezi kapalinou a plynem [Pa.m]

r_1, r_2 ... hlavní poloměry křivosti [m]

Současný stav problematiky

V současné době je k testování vzlinavosti (resp. sací výšky) používána metoda dle ČSN 80 08 28, která umožňuje kvantifikovat vzlinání kapaliny v textilií. Tato metoda je používána k testování kvality odšlichtování.

Problematické smáčení je věnována velká pozornost - např. se pracuje na simulaci smáčecích dějů (nejen za pomoci Isingova modelu), na vypracovávání technik pro stanovení kontaktních úhlů u speciálních vláken (např. uhlíková), na predikce kontaktních úhlů (resp. mezipovrchových napětí) z kohezních energií ...

Predikce vzlinavosti v reálných textilních je v současnosti nemožná - v literatuře není dosud exaktně popsána. Literární údaje jsou dílčí a neúplné.

Cíle práce

Cílem práce je nalézt model použitelný pro popis rovnováhy smáčecího procesu při kontaktu svazku vláken s kapalinou.

Tato práce by měla být základní studií pro budoucí systém, umožňující predikci smáčení vícerozměrných textilních útvarů za reálných podmínek.

Model smáčení svazku vláken

Svazek vláken:

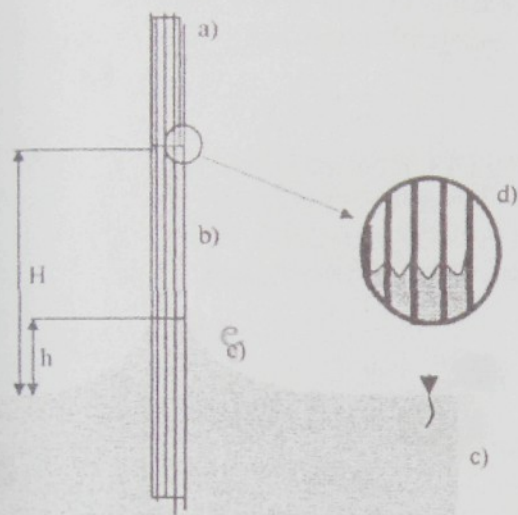
Za nejjednodušší jednorozměrný útvar lze považovat vlákno a případně svazek rovnoběžných vláken. Svazkem vláken se rozumí v této práci útvar dostatečné délky kruhového průřezu, s konstantním zaplněním a bez kolísání délkové hmotnosti. Tímto útvarem může být: monofil, hedvábi, kabel... Experimentálně nejvhodnější je syntetické hedvábi.

Poznámka: U přízi je při sledování vzlinavosti problém komplikován nestejnoměrností útvaru - různá zaplnění v různé vzdálenosti od osy přize, kolísání jemnosti, obtížné definování směru vláken, změny zaplnění v závislosti na předpětí, chlupatost, změny zaplnění vlivem přítomnosti kapaliny („přilepení“ chlupatosti k jádru přize) ...

Výsledek vztlínání:

Při vztlínání se ustálí povrch kapaliny v takové poloze, aby vzniklý útvar byl energeticky nejvýhodnější (minimální styčnou plocha kapaliny se vzduchem, maximální se smáčivým vláknem, minimální výška těžiště útvaru ...).

Při vztlínání svazkem vláken kapalina zaujme v obecném případě tvar zakreslený na následujícím obrázku:



Obrázek 2: Obecný případ vztlínání kapaliny do svazku vláken

a) svazek rovnoběžných vláken - část bez kapaliny

b) svazek rovnoběžných vláken - část s kapalinou; maximální výška, do které kapalina ve svazku je označena H; jedná se o **hlavní část** vyvzlínané kapaliny

c) kapalina

d) detail tvaru kapaliny v kontaktu s vlákny ve výšce H (dvourozměrný řez útvarem) - **svrchní oblast**

e) **přechodová oblast** (o maximální výšce h) mezi smočenými vlákny a povrchem „vzdálené“ kapaliny

Výsledek vztlínání je závislý na řadě faktorů - příkladem mohou být faktory ovlivňující mezipovrchová napětí (teplota, tlak, nečistoty, polarita...), ostatní vlastnosti kapaliny (viskozita, odpařování kapaliny...), vlastnosti vláken (členitost povrchu, jemnost vláken ...).

Podle počtu vláken, zaplnění, mezipovrchových vlastností atd. se jednotlivé části vyvzlínaného útvaru (viz obrázek 2) podílejí na rovnováze smáčení v různé míře.

Vzniklý tvar vyvzlínané kapaliny (viz obrázek 1) lze rozdělit na několik elementárních částí:

1) „**Hlavní část**“, jejímž objemem procházejí vlákna.

Kapalina vyplňuje mezivlákněné prostory a vytváří útvar s minimální energií. Těmto podmínkám odpovídá válec, ve kterém jsou obsažena všechna smočená vlákna. Tento válec má povrch tvořený kapalinou a částečně nesmočenými vlákny. Konkrétní situace je závislá na hydrostatickém tlaku, průměru válce, zaplnění, jemnosti vláken, mezipovrchových napětích...

Výpočet tvaru povrchu kapaliny je komplikovaný. Nejprve je nutné vypočítat křivost povrchu v dané výšce nad volnou hladinou kapaliny. Pro výpočet křivosti lze použít Laplaceovu rovnici (viz výše). Protože v tomto případě je křivost ve směru osy vlákna zanedbatelná, lze psát:

$$P = \sigma_{LG} \times \left(\frac{1}{r_1} \right)$$

kde: P ... relativní tlak [Pa]

σ_{LG} ... povrchové napětí mezi kapalinou a plynem [Pa.m]

r_1 ... poloměr křivosti vláken [m]

Tlak vyvolaný křivostí povrchu vždy odpovídá tlaku hydrostatickému. Hydrostatický tlak je závislý na výšce nad volnou hladinou kapaliny:

$$P_H = h \times g \times \rho$$

kde: P_H ... relativní hydrostatický tlak [Pa]

g ... gravitační zrychlení $9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$

ρ ... hustota kapaliny $[\text{kg.m}^{-3}]$

h ... výška nad volnou hladinou [m]

Z těchto dvou rovnic lze vyjádřit poloměr křivosti povrchu kapaliny (r_1 [m]) jako funkci výšky nad volnou hladinou:

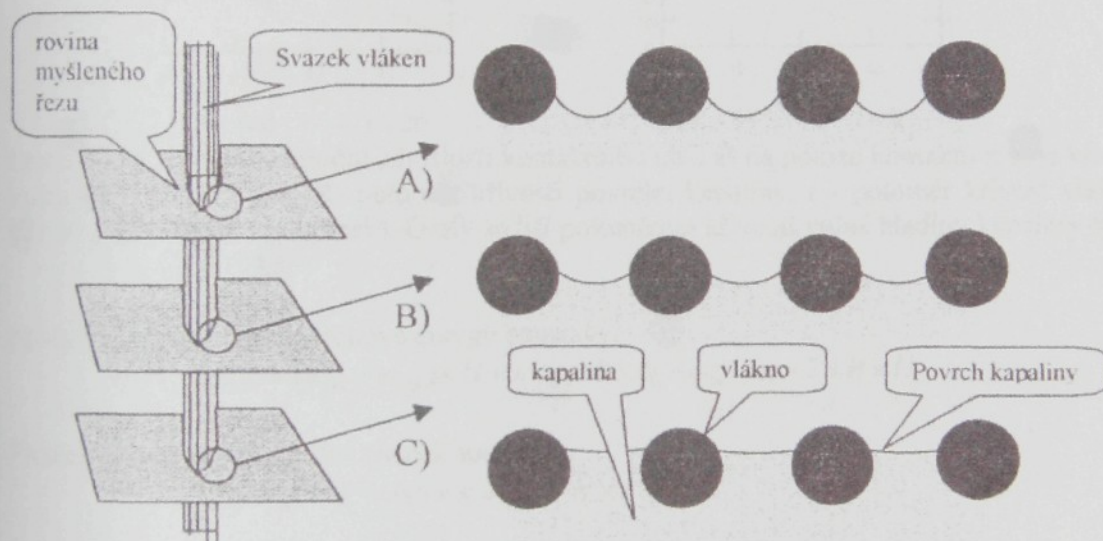
$$r_1 = \frac{\sigma_{SG}}{h \times g \times \rho}$$

kde: g ... gravitační zrychlení $9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$

ρ ... hustota kapaliny $[\text{kg.m}^{-3}]$

h ... výška nad volnou hladinou [m]

σ_{LG} ... povrchové napětí mezi kapalinou a plynem [Pa.m]



Obrázek 3- Vliv hydrostatického pod(!)tlaku (resp. výšky) na křivost povrchu kapaliny na povrchu svazku vláken

A) situace téměř ve výšce H nad volnou hladinou kapaliny - hydrostatický tlak je extrémně vysoký, proto je křivost povrchu vysoká - malý poloměr křivosti umožňuje spojit pouze velmi blízká vlákna (vysoké zaplnění, členitý povrch)

B) mezistupeň mezi A) a C)

C) situace v malé výšce nad volnou hladinou kapaliny - hydrostatický podtlak je nízký, proto je nízká i křivost (velký poloměr) volného povrchu kapaliny

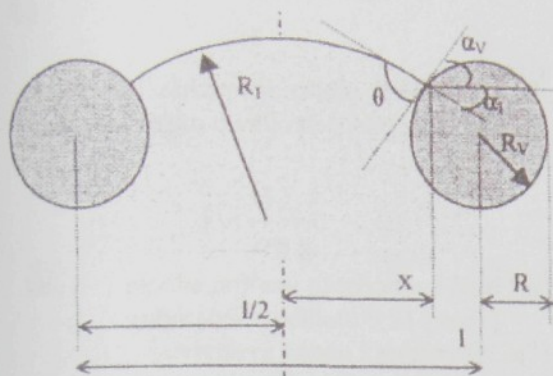
Při uspořádání vláken jako je na obrázku 5, lze za předpokladu konstantního zaplnění odvodit vztah pro průměrnou vzdálenost os vláken na povrchu svazku vláken:

$$l = \sqrt{\frac{\pi \times R_v^2}{Z}}$$

kde: Z ... zaplnění svazku vláken

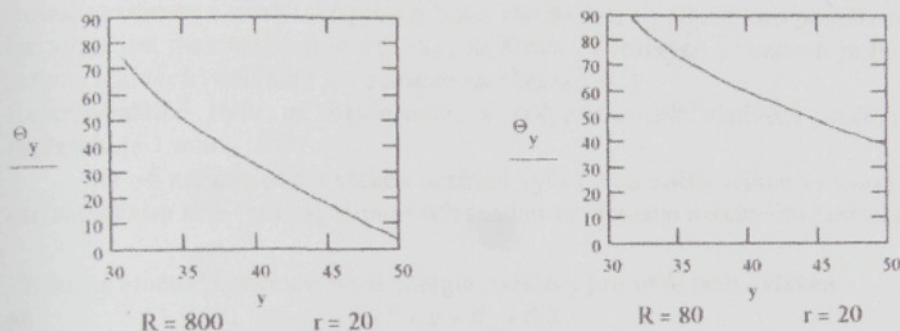
R_v ... poloměr vlákna [m]

l ... vzdálenost os dvou sousedních vláken [m]



Obrázek 4 - Detailní zakreslení křivosti (R_1, R_v), vzdáleností ($l, l/2, x$) a smáčecího úhlu (θ) při kontaktu vláken s kapalinou

Za použití výše uvedených vzorců a geometrických úvah lze vypočítat jak závisí kontaktní úhel θ na poloze kontaktu x a na křivosti stýkajících se povrchů:



Obrázek 5: Ukázka výpočtu závislosti kontaktního úhlu θ na poloze kontaktu x a na křivosti stýkajících se povrchů (R - poloměr křivosti povrchu kapaliny, r - poloměr křivosti vláken). $l/2=50$ (viz předchozí obrázek). Grafy se liší poloměrem křivosti volné hladiny kapaliny R .

Příslušná změna mezipovrchové energie soustavy:

$$\Delta E_{MP} = (\sigma_{LG} - \sigma_{GS}) \times H \times \pi \times r \times 2 \times N - \sigma_{LG} \times \pi \times 2 \times R \times H$$

Příslušná změna potenciální energie soustavy:

$$\Delta E_p = \rho \times H^2 \times 0,5 \times \pi \times (R^2 - N \times r^2)$$

2) přechodová oblast o maximální výšce h

Pro popis hladinové plochy v okolí jednoho vlákna vyhovuje následující exponenciální rovnice:

$$h_r = a \times e^{-b \times r}$$

h_r ... výška hladiny ve vzdálenosti od osy vlákna [m]

a, b ... experimentálně zjistitelné konstanty

r ... vzdálenost od osy vlákna [m]

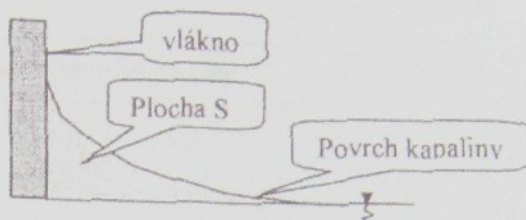
Poznámka: V publikaci^{5,6} jsou byl doporučen model, kde h je exponenciálně závislé na vzdálenosti od povrchu vlákna. Tento model je obtížně aplikovatelný na vícerozměrné hladinové plochy. Takto navržený model je nepoužitelný pro vlákna nekruhového průřezu.

Maximální výšku h lze vypočítat z povrchového napětí kapaliny. Základem výpočtu je úvaha, že celá hmotnost kapaliny v přechodové oblasti „visí“ na povrchové vrstvě kapaliny - jejíž

maximální zatížení je přímo úměrné povrchovému napětí. Při zjednodušujícím předpokladu smáčení svazku o velkém (nekonečném) poloměru lze dojít ke vztahu:

$$S = \frac{\sigma_{LG}}{\rho \times g}$$

kde S ... plocha průřezu přechodové části [m^2]
 g ... gravitační zrychlení $9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
 σ_{LG} ... povrchové napětí kapaliny [N.m^{-1}]
 ρ ... Hustota kapaliny [kg.m^{-3}]



Pro vodu (povrchové napětí $0,072 \text{ N.m}^{-1}$) obecně vychází maximální plocha $S=0,72\text{mm}^2$. Pokud vezmeme v úvahu, že plocha S má zhruba tvar trojúhelníka s poměrem odvěsen $1:1,5$, lze vypočítat maximální hodnotu $h_{\text{max}}=0,97\text{mm}$. V reálných případech je hodnota h menší - jeden z reálných problémů je naznačen na obrázku 3C).

Experimentálně bylo na bavlněných a polyesterových vláknech ověřeno, že výška h nepřesahuje 1 mm .

Již od malého počtu vláken nezávisí výška h na počtu vláken ve svazku. Výška h roste i se zaplněním nitě - při experimentech snadno dosáhneme maximální hodnoty.

Patřičná změna mezipovrchové energie soustavy pro větší počty vláken:

$$\Delta E_{\text{MP}} = \sigma_{LG} \times h \times 2 \times \pi \times R_N \times 0.8$$

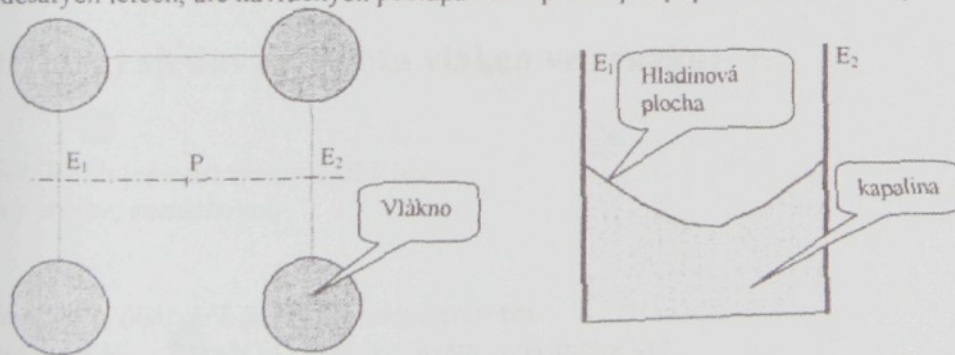
Patřičná změna potenciální energie soustavy:

$$\Delta E_p = 0$$

3) Pilovitá část

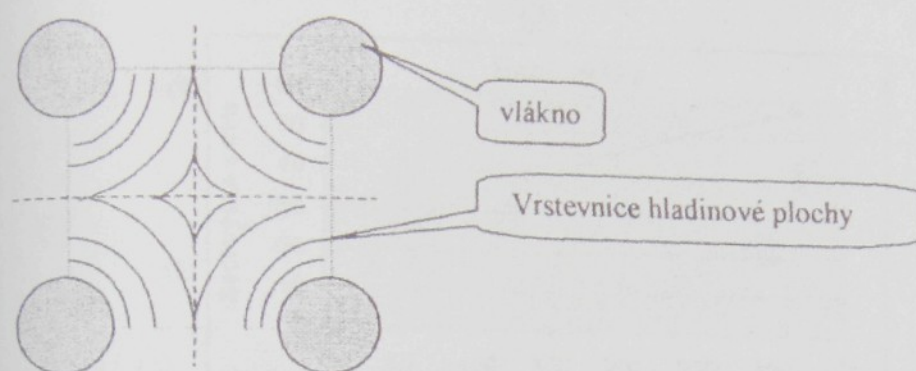
Elementární část, která je na obrázku 2 zobrazena v detailu, je svým tvarem vysoce závislá na zaplnění vláknenného útvaru (resp. na vzájemné vzdálenosti vláken). Povrch tohoto útvaru je obtížné predikovat, nejlepší výsledky poskytuje simulační metoda⁷, která je založena na Isingově modelu.

Výšku vyvzhlínání kapaliny v definovaných bodech mezi vlákny publikoval Princen⁸⁹ už v šedesátých letech, ale navržených postupů nelze použít pro popis celé hladinové plochy.



Obrázek 5: Tvar povrchu kapaliny mezi vlákny

- Situační náčrt, ve kterém jsou definovány body (E_1 , E_2), mezi nimiž je sledován průběh hladinové plochy. Pearson se zabíral pouze výškou hladiny v bodě P na povrchu kapaliny.
- Tvar povrchu kapaliny mezi body E_1 a E_2 (typická ukázka)



Obrázek 6: Vrstevnice hladinové plochy získané výpočtem

Reálný tvar svrchní části je velmi obtížné definovat - průběh je složitý, lze jej získat pouze simulačními postupy. Experimentálně bylo pozorováno, že tvar pilovité části se nemění s h , ani s H . Plocha připadající na jedno vlákno je prakticky konstantní.

Na tomto základě lze odvodit:

Příslušná změna mezipovrchové energie soustavy:

$$\Delta E_{MP} = (\pi \times R_N^2 - N \times \pi \times R_f^2) \times w_l \times \sigma_{LG}$$

Příslušná změna potenciální energie soustavy:

$$\Delta E_p = 0$$

U smáčivých nití je vliv přírůstku povrchu kapaliny z pilovité části zanedbatelný.

Experiment sledování počtu vláken ve svazku:

Materiál: PESH jemnost fibrily 0,021 tex

Kruhový průřez, nematováno

Kapalina: voda obarvená substantivním barvivem

Povrchové napětí: $72 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ (stanoveno stalagmometricky)

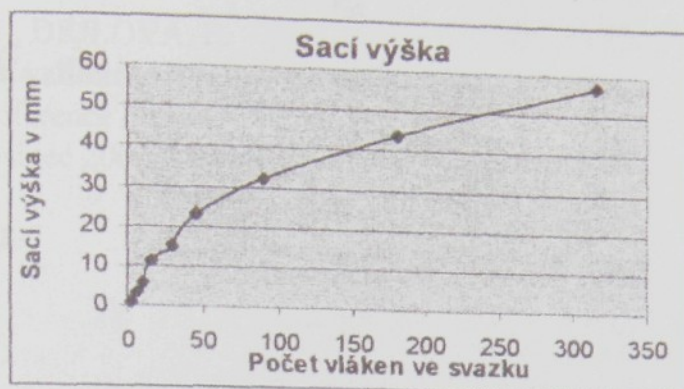
Hustota: $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Pokus:

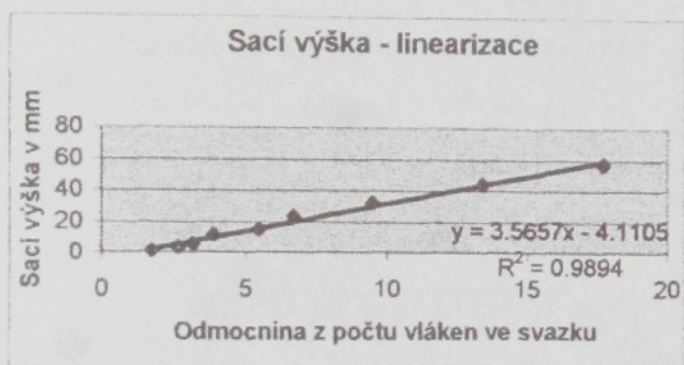
Vliv počtu vláken ve svazku na rovnováhu vzlinání.

Do držáku byl upnut jednorozměrný textilní útvar (svazek vláken) a byla sledována rovnováha vzlinání. Experiment byl odvozen z ČSN 80 08 28.

Výsledky:



Obrázek : Závislost sací výšky H (viz obrázek 2) na počtu vláken ve svazku (všechny ostatní parametry experimentu jsou konstantní)



Obrázek : Závislost sací výšky (H - viz obrázek 2) na počtu vláken ve svazku (všechny ostatní parametry experimentu jsou konstantní) - v linearizovaných souřadnicích

Použitá linearizace byla navržena podle výše uvedeného modelu vztlínání (za použití zjednodušených vztahů).

¹ Pearson, J.: přednáška na TU Liberec, říjen 2000

² Shaw, D. J.: Introduction to colloid and surface chemistry, Butterworths, 1980

³ Malinowska, K.: Práce Inst. Wlok., 29, Lodz 1979

⁴ Bartovská, L., Šišková, M.: Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav, VŠCHT Praha, 1999

⁵ Dembický, J.: Mezinárodní konference, Ružomberok, říjen 1999

⁶ Dembický, J., Wiener, J.: Vliv barvení a chemického namáhání na povrchové vlastnosti vláken, Transfer 99,

Bmo, 7. - 8. červen 1999

⁷ Lukáš, L., Martinová, L., Strutex, 6. národní konference, prosinec 1999

⁸ Princen H. M.: Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 30, 1, May 1969

⁹ Princen H. M.: Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 30, 3, July 1969

[Příloha 7]

Autor: WIENER, J., DEJLOVÁ, P.

Název: **Rovnováha vztlínání kapaliny do nitě**

Konference: 9. Conference Strutex

Konaná: 2. - 3. prosinec 2002, Liberec

Stránka: 367-374

ISBN: 80-7083-668-7

Fakulta textilní
Technické univerzity v Liberci
a
Česká sekce Textile Institute Manchester

STRUTEX

Struktura a strukturní mechanika textilií

Structure and Structural Mechanics of Textile Fabrics



The Textile Institute

*9. mezinárodní konference
9th international conference*

2002

STRUTEX

9. mezinárodní konference

TU v Liberci, prosinec 2002

ROVNOVÁHA VZLÍNÁNÍ KAPALINY DO NITĚ

Jakub Wiener¹, Petra Dejlová²

Abstrakt: Navržený model je založen na zjednodušeném popisu struktury nitě a pracuje s textilním popisem její struktury. V modelu se vyskytují tyto textilní parametry: jemnost vláken, počet vláken v řezu nitě, tvarový faktor vláken a zaplnění. Detailně je popsán útvar vzniklý vyvzlínáním kapaliny do délkové textilie, jednotlivé jevy jsou diskutovány. Významné parametry jsou použity v modelu vzlínání. Parametry, jejichž vliv je u běžných nití velmi malý, jsou zanedbány. Navržený model vzlínání umožňuje vyjádřit funkční závislost sací výšky na parametrech nitě v analytickém tvaru.

Jednou z důležitých vlastností textilie je její chování při kontaktu s vodou (obecně kapalinou). Tato práce se zabývá samovolným vzlínáním kapalin, které do značné míry ovlivňuje zejména spotřebitelské vlastnosti textilie. Pokud v textilií vzlíná voda - lze ji použít např. pro odvod kapalného potu od pokožky, pro výrobu ručníků a utěrek, textilií určených k úklidovým pracem... Vzlinání umožňuje použít textilie i pro řadu speciálních aplikací: knoty do svíček a lamp na lůh či olej, nebo některé moderní nehořlavé úpravy bytových textilií¹... Samovolné vzlínání kapaliny v textiliích je dosud nedostatečně teoreticky prozkoumáno. Vzlinání lze rozdělit formálně na průběh a výsledek vzlínání, v této práci je analyzována rovnováha, tedy výsledek procesu. Statické (rovnovážné) procesu vzlínání není věnována dostatečná pozornost, a přitom na ní lze odhalit řadu jevů, které ovlivňují z praktického hlediska zajímavější dynamiku procesu. Rovnováhu procesu většina autorů chápe jen jako fyzikální konstantu bez vypovídací hodnoty. Často dochází z neznalosti specifik vzlínání do textilního útvaru (resp. trpným přejímáním teorií z jiných poréznic soustav) také k zanedbání důležitých faktorů a výsledky jsou pak zatíženy zbytečnou chybou^{II, III}.

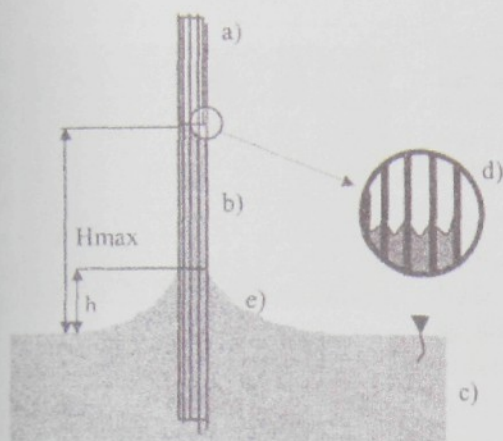
Pro analýzu statiky vzlínání se běžně používají vztahy platné pro kapiláry. Zásadním rozdílem mezi klasickou kapilárou a textilií je v tom, že kapilára je „uzavřený“ a textilie „otevřený“ kapilární systém. Z kapiláry kapalina nevyteče do stran – brání jí v tom pevné stěny. V textilií žádné pevné stěny nejsou - kapalina je v soustavě držena svým povrchovým napětím.

1. Navržený model vzlínání kapaliny do nitě

Tento model byl částečně publikován.^{IV} Nitě se rozumí v této práci nadvláknový útvar dostatečné délky kruhového průřezu, s konstantním zaplněním a bez kolísání délkové hmotnosti. Tímto útvarem může být: monofil, hedvábi, kabel... Experimentálně nejvhodnější je syntetické hedvábi. Při vzlínání svazkem vláken kapalina zaujme v obecném případě tvar zakreslený na následujícím obrázku:

¹ Ing. Jakub Wiener, Ph.D., jakub.wiener@vslib.cz, katedra textilního zúšlechťování, TU Liberec
The Key Lab. of Textile Science & Education, Ministry of Education, China (visit school)

² Ing. Petra Dejlová, doktorand fakulty textilní, TU Liberec



Obr. 1: Obecný případ vztlínání kapaliny do svislého svazku vláken

- a) svazek vláken - část bez kapaliny
- b) svazek vláken - část s kapalinou; v rovnováze kapalina vyvzlíná do maximální výšky H_{max} ; jedná se o hlavní část vyvzlínané kapaliny
- c) kapalina
- d) detail tvaru kapaliny v kontaktu s vlákny ve výšce H_{max} (dvourozměrný řez útvarem) - svrchní oblast
- e) přechodová oblast (o maximální výšce h) mezi smočenými vlákny a povrchem „vzdálené“ kapaliny

Výsledek vztlínání je závislý na řadě faktorů - příkladem mohou být faktory ovlivňující mezipovrchová napětí (teplota, tlak, nečistoty, polarita...), ostatní vlastnosti kapaliny (viskozita, odpařování kapaliny...), vlastnosti vláken (členitost povrchu, jemnost vláken...). Podle počtu vláken, zaplnění, mezipovrchových vlastností atd. se jednotlivé části vyvzlínaného útvaru (viz obr. 1) podílejí na rovnováze smáčení v různé míře. Pro obvyklé textilní nitě (příze, hedvábi) má rozhodující vliv na sací výšku „hlavní část“ útvaru.

Hlavní část

Kapalina vyplňuje mezivláknenné prostory a vytváří útvar s minimální energií. Těmto podmínkám odpovídá válec, ve kterém jsou obsažena všechna smočená vlákna. Tento válec má povrch tvořený kapalinou a částečně nesmočenými vlákny. Konkrétní situace je závislá na hydrostatickém tlaku, průměru válce, zaplnění, jemnosti vláken, mezipovrchových napětích...

Základem je výpočet křivosti povrchu kapaliny v dané výšce nad její volnou hladinou. Výše uvedená Laplaceova rovnice (2) může být zjednodušena, protože křivost ve směru osy vlákna je nulová, resp. poloměr křivosti nekonečný:

$$P = \sigma_{LG} \times \left(\frac{1}{R_K} \right) \quad (1)$$

P ... relativní tlak [Pa]

σ_{LG} ... povrchové napětí mezi kapalinou a plynem [N.m^{-1}]

R_K ... poloměr křivosti hladinové plochy [m]

Hydrostatický tlak je v kapalině kompenzován tlakem vyvolaným křivostí volného povrchu kapaliny. Na základě Laplaceovy rovnice lze pro povrch hlavní části vyjádřit poloměr křivosti:

$$R_K = \frac{\sigma_{LG}}{H \times g \times \rho} \quad (2)$$

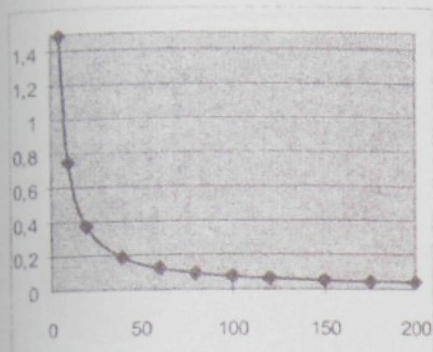
g ... gravitační zrychlení $9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$

ρ ... hustota kapaliny [kg.m^{-3}]

H ... výška nad volnou hladinou [m]

σ_{LG} ... povrchové napětí mezi kapalinou a plynem [N.m^{-1}]

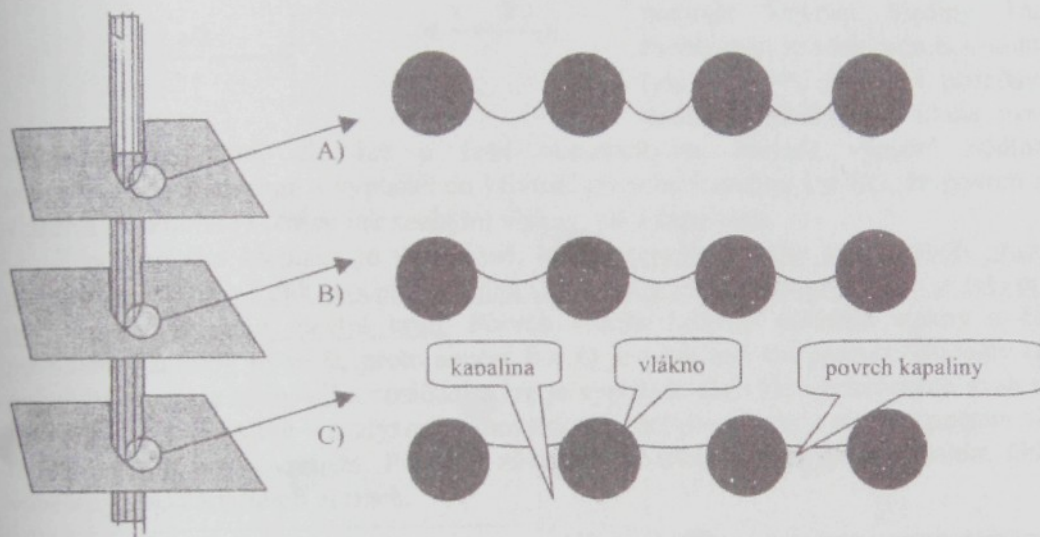
Pokud tedy známe povrchové napětí kapaliny a její hustotu, lze vypočítat, jakou křivost bude mít hladina kapaliny v různých výškách nad svým nezakřiveným povrchem. Pro vodu byl vypočítán následující graf:



Obr. 2: Závislost poloměru křivosti hladinové plochy na výšce nad její nezakřivenou hladinou pro vodu (povrchové napětí 0.073 N.m^{-1} , hustota 1000 kg.m^{-3} , $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$)

Osa x ... výška nad nezakřivenou hladinou kapaliny [mm]
Osa y ... poloměr křivosti hladiny kapaliny [mm]

Obr. 2 lze aplikovat na soustavu paralelních vláken – křivost povrchu kapaliny na povrchu svazku bude závislá na její výšce nad její nezakřivenou hladinou. Schematicky tuto situaci znázorňuje následující obr. 3:



Obr. 3: Vliv hydrostatického pod(!)tlaku (resp. výšky) na křivost povrchu kapaliny na povrchu svazku vláken

A) situace téměř ve výšce H_{max} nad volnou hladinou kapaliny – hydrostatický podtlak je extrémně vysoký, proto je křivost povrchu vysoká - malý poloměr křivosti umožňuje spojit pouze velmi blízká vlákna (vysoké zaplnění)

B) mezistupeň mezi A) a C)

C) situace v malé výšce nad volnou hladinou kapaliny - hydrostatický podtlak je nízký, proto je nízká i křivost (velký poloměr) volného povrchu kapaliny

Za předpokladu konstantního zaplnění lze odvodit vztah pro průměrnou vzdálenost os vláken ve svazku:

$$a = k \times \sqrt{\frac{\pi \times R_v^2}{\mu}} \quad (3)$$

μ ... zaplnění svazku vláken [-]

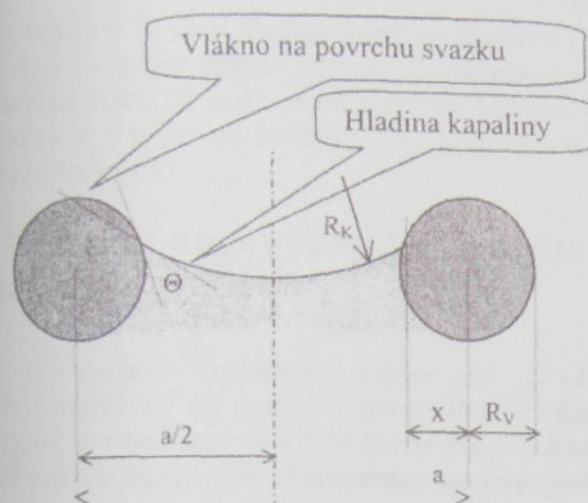
R_v ... poloměr vlákna [m]

l ... vzdálenost os dvou sousedních vláken [m]

a ... vzdálenost os dvou sousedních vláken [m]

Pláštové uspořádání vláken: $k=1.075$ - Čtvercové uspořádání vláken: $k=1$

Na následujícím obr. 4 je znázorněn povrch kapaliny mezi dvěma vlákny na povrchu válcové části (viz obr. 2 a obr. 3).



Obr. 4: Detailní zakreslení geometrie kontaktu kapaliny a vláken na povrchu textilie

R_v ... poloměr vlákna

R_k ... poloměr křivosti hladinové plochy

X ... bod kontaktu vlákna a hladiny kapaliny

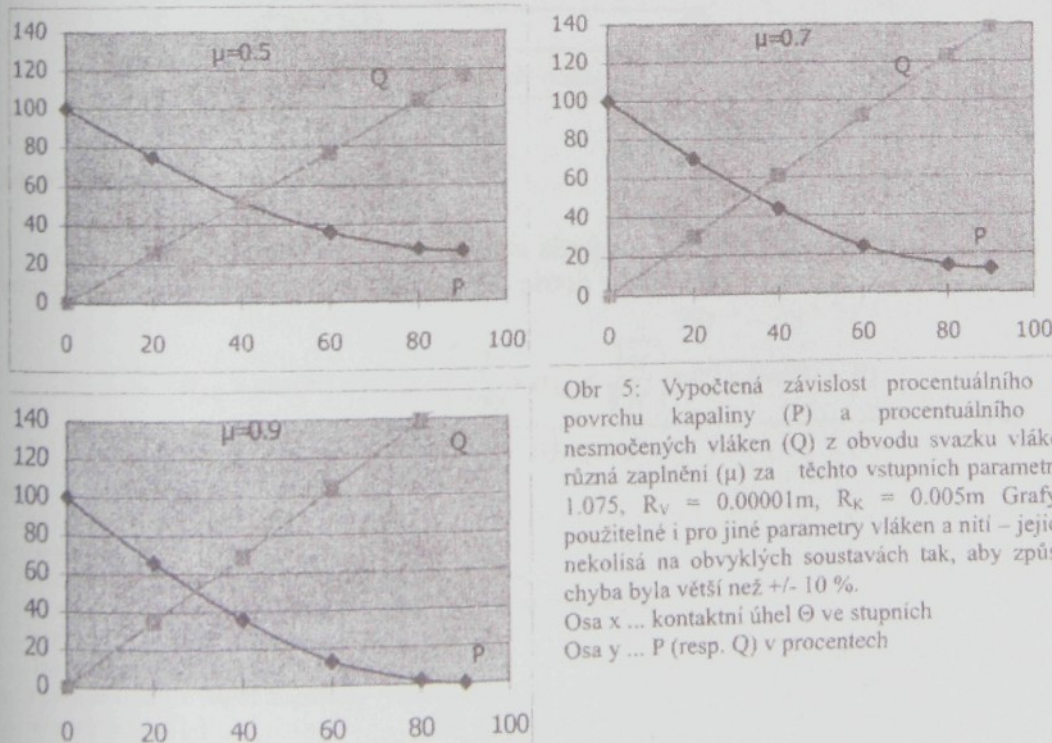
Θ ... kontaktní úhel

a ... vzdálenost os dvou sousedních vláken

Za předpokladu, že povrch kapaliny i vlákna má tvar kružnice, lze tuto úlohu snadno řešit, známe-li poloměr vlákna a poloměr křivosti hladiny kapaliny. Problémem je však určit bod kontaktu x (viz Obr. 4), splňující požadavky na kontaktní úhel. Tato úloha nevede k

analytickému řešení, ale lze ji řešit numericky. Na základě výpočtů podložených geometrickými úvahami a vypočtenou křivostí povrchu kapaliny lze říci, že povrch svazku vláken s kapalinou je tvořen jak suchými vlákny, tak i kapalinou.

Z praktického hlediska je významné, kolik procent povrchu svazku tvoří nesmočený povrch vláken (Q) a kolik procent kapalina (P). Za povrch svazku, ze kterého se tyto procenta počítají, se považuje ideální kruh. Povrch svazku tvořený částečně vlákny a částečně povrchem kapaliny je větší, proto součet P a Q je větší než sto procent. Hodnoty (P a Q) ovlivňují proces a rovnováhu smáčení a lze je vypočítat dle výše vyznačených úvah nebo je lze určit experimentálně – analýzou rovnováhy vztlaku pro svazky s různým počtem vláken a tedy i s odlišným povrchem. Průběhy závislosti hodnoty P a Q na kontaktním úhlu jsou vyneseny v následujících grafech.



Obr. 5: Vypočtená závislost procentuálního podílu povrchu kapaliny (P) a procentuálního podílu nesmočených vláken (Q) z obvodu svazku vláken pro různá zaplnění (μ) za těchto vstupních parametrů: $k = 1.075$, $R_v = 0.00001\text{m}$, $R_k = 0.005\text{m}$. Grafy jsou použitelné i pro jiné parametry vláken a niti – jejich vliv nekolísá na obvyklých soustavách tak, aby způsobená chyba byla větší než $\pm 10\%$.

Osa x ... kontaktní úhel Θ ve stupních
Osa y ... P (resp. Q) v procentech

Poloměr křivosti hladiny kapaliny hodnoty P a Q neovlivňuje, dokud neklesne poloměr křivosti na řádově stejnou hodnotu, jakou má povrch vlákna. Tento případ by nastal ve výšce několika metrů (!) nad volnou hladinou kapaliny – této výšky na reálných soustavách nelze dosáhnout a proto lze hodnoty P a Q považovat za konstantní pro jednu soustavu „svazek vláken-kapalina“.

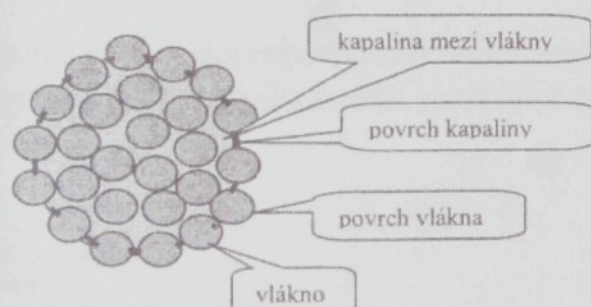
2 Výpočet sací výšky ve svislém svazku rovnoběžných vláken

Pro svazky rovnoběžných vláken platí, že přechodová oblast a svrchní oblast mají jen velmi malý vliv na proces a rovnováhu vztlínání. Výpočet rovnováhy vztlínání může být založen na rovnováze sil v řezu hlavní části. V bodě maximální (rovnovážné) sací výšky bude mezipovrchová síla právě kompenzována silou gravitační:

V řezu se pak uplatňují mezipovrchová napětí na těchto mezifázích:

- mezi vláknem a vzduchem (nesmočené části vláken)
- mezi vláknem a kapalinou (smočené části vláken)
- mezi kapalinou a vzduchem (volný povrch kapaliny)

O tom, jaká část vláken je smočena atd., rozhodují fyzikálně - chemické jevy. Realistickou ukázkou řezu svazkem smočených vláken představuje následující obrázek:



Obr. 6: Řez přízí s kapalinou

Systém bude v rovnováze, až gravitační síla bude právě kompenzována výslednou silou mezipovrchovou. Na základě této úvahy lze přímo vyjádřit maximální sací výšku H_{max} :

$$H_{max} = \frac{\sigma_{LG} \times \cos(\Theta) \times 2 \times \mu - \left(\frac{2}{100} \times \sigma_{LG} \times \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \times (Q \times \cos(\Theta) + P)}{R_v \times (1 - \mu) \times g \times \rho} \quad (4)$$

H_{max} rovnovážná sací výška [m]

N ... počet vláken ve svazku [-]

R_v ... poloměr vlákna [m]

P ... procentuální podíl kapaliny z povrchu svazku [%]

Q ... procentuální podíl nesmočených vláken z povrchu svazku [%]

μ ... zaplnění [-]

ρ ... hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

σ_{LG} ... mezipovrchové napětí kapalina – vzduch [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]

Θ ... kontaktní úhel [-]

Poznámka: V hypotetické situaci, kdy je počet vláken ve svazku nekonečný a povrch svazku neexistuje, by byla smočena všechna vlákna v řezu svazku vláken. Sací výška pro tento případ vychází:

$$H_{\max}(n = \infty) = \frac{\sigma_{LG} \times 2 \times \cos(\Theta) \times \mu}{R_v \times g \times \rho \times (1 - \mu)} \quad (5)$$

$H_{\max}(n = \infty)$... rovnovážná sací výška ve svazku o nekonečném počtu vláken [m]
 N ... počet vláken ve svazku [-]
 R_v ... poloměr vlákna [m]
 μ ... zaplnění [-]
 ρ ... hustota kapaliny [kg.m⁻³]
 σ_{LG} ... mezipovrchové napětí kapalina – vzduch [N.m⁻¹]
 Θ ... kontaktní úhel [-]

Pokud chceme použít tento zjednodušený vzorec, musí být ve svazku jistý minimální počet vláken. Za předpokladu, že akceptujeme maximálně 10%ní odchylku mezi $H_{\max}$ a $H_{\max}(n = \infty)$, je minimální počet vláken ve svazku dán tímto vzorcem:

$$N = \frac{1}{100 \times \mu} \times \left(Q + \frac{P}{\cos(\Theta)} \right)^2 \quad (6)$$

Pro případ, že $\mu=0.5$, $\Theta=80^\circ$, ($P=25$ a $Q=120$) vychází $N=50$.
 Pro případ, že $\mu=0.9$, $\Theta=80^\circ$, ($P=0$ a $Q=140$) vychází $N=200$.
 Pro případ, že $\mu=0.9$, $\Theta=20^\circ$, ($P=65$ a $Q=35$) vychází $N=200$.

Výpočet sací výšky ve svazku rovnoběžných vláken nekruhového průřezu

Odchylku tvaru vlákna od kruhu lze vyjádřit pomocí tvarového faktoru q , který definovala K. Malinowska^V jako:

$$q = \frac{O}{2 \times \pi \times R_v} - 1 \quad (7)$$

q ... tvarový faktor vlákna [-]
 O ... obvod vlákna [m]
 R_v ... poloměr vlákna [m]

Pokud je průřez vlákna kruhový, platí $q = 1$, ve všech ostatních případech je $q > 1$.

V případě, že vlákna nemají kruhový průřez, obecně platí tytéž zákonitosti. Proto platí:

$$H_{\max} = \frac{(1 + q) \times (\sigma_{LG} \times \cos(\Theta) \times 2 \times \mu) - \left(\frac{2}{100} \times \sigma_{LG} \times \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \times (Q_{NK} \times \cos(\Theta) + P_{NK})}{R_v \times (1 - \mu) \times g \times \rho} \quad (8)$$

P_{NK} ... procentuální podíl kapaliny z povrchu svazku pro nekruhová vlákna [%]
 Q_{NK} ... procentuální podíl nesmočených vláken z povrchu svazku pro nekruhová vlákna [%]

Situace je však komplikována: spočítat parametry P_{NK} a Q_{NK} pro nekruhová vlákna je obtížné, protože záleží na jejich natočení a přesném popisu jejich tvaru. Proto je žádoucí pracovat se sací výškou ve svazku o nekonečném počtu vláken ($H_{\max}(n = \infty)$), která není hodnotou P a Q ovlivněna. Postup získání sací výšky ve svazku o nekonečném počtu vláken ($H_{\max}(n = \infty)$) je uveden výše.

S rostoucím tvarovým faktorem se zvýší i délka mezifáze mezi vláknem a kapalinou. Pro rovnovážnou sací výšku ve svazku o nekonečném počtu vláken ($H_{\max}(n = \infty)$) tedy platí:

$$H_{\max}(n = \infty) = \frac{\sigma_{LG} \times 2 \times \cos(\Theta) \times \mu \times (1 + q)}{R_v \times g \times \rho \times (1 - \mu)} \quad (9)$$

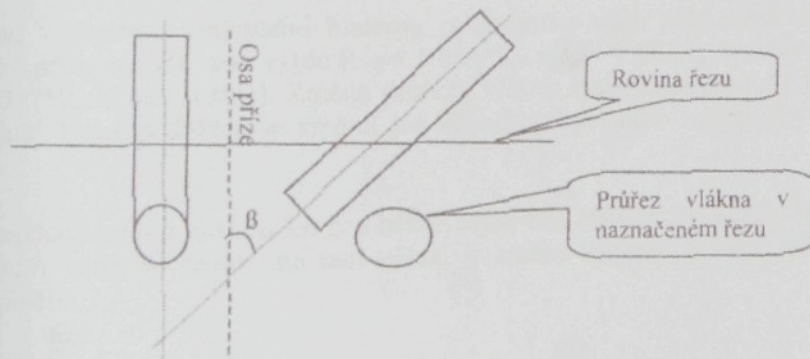
Pokud není možné experimentálně $H_{\max}(n = \infty)$ stanovit, lze parametry P_{NK} a Q_{NK} odhadnout na základě geometrické úvahy: parametr P_{NK} (resp. Q_{NK}) se vůči P (resp. Q) pro vlákna kruhového řezu zvětší přímo úměrně $(1 + q)$. Za tohoto zjednodušení platí:

$$H_{\max} = \frac{(1 + q) \times \left(\sigma_{LG} \times \cos(\Theta) \times 2 \times \mu - \left(\frac{2}{100} \times \sigma_{LG} \times \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \times (Q \times \cos(\Theta) + P) \right)}{R_v \times (1 - \mu) \times g \times \rho} \quad (10)$$

Výpočet sací výšky ve svislé přízi

Pokud přejdeme z vláken nekonečných na vlákna konečná, pak vzrostou nestejnoměrnosti útvaru - různá zaplnění v různé vzdálenosti od osy příze, kolísání jemnosti, obtížné definování směru vláken, změny zaplnění v závislosti na předpětí, chlupatost, změny zaplnění vlivem přítomnosti kapaliny („přilepení“ chlupatosti k jádru příze) ...

Hlavním problémem se zdá být zákrut příze. Problém zákrutu je v této práci převeden na problém průřezu vlákna. Vliv zákrutu (tedy naklonění vláken v přízi vůči její ose) se projeví deformací průřezu - z kruhového se stává eliptický:



Obr. 7: Zdánlivá změna průřezu vlákna zapříčiněná zákrutem nitě

Oproti původnímu řezu vlákna (bez náklonu) došlo k deformaci plochy řezu i obvodu řezu vlákna. Náklon vlákna si lze představit tak, jakoby vlákno bylo nahrazeno silnějším vláknem eliptického řezu. Zdánlivá jemnost vlákna se změní přímo úměrně se změnou plochy řezu. V souladu s tím se změní i zdánlivý poloměr vlákna R_{vE} :

$$R_{vE} = R_v \times \sqrt{\frac{\pi \times R_v^2}{\cos(\beta)}} = R_v \times \sqrt{\frac{1}{\cos(\beta)}} \quad (11)$$

Pro obvod elipsy neexistuje přesný vzorec, použitelná je následující aproximace, která poskytuje přijatelné výsledky pro všechny úhly β - získáme tento vztah:

$$O_E = \pi \times \left(1.5 \times \left(R_V + \frac{R_V}{\cos(\beta)} \right) - \sqrt{R_V \times \frac{R_V}{\cos(\beta)}} \right) \quad (12)$$

Pro výpočet sací výšky má velký význam obvod vlákna a povrch vlákna (resp. obvod jeho řezu). Pro popis nekruhovosti vlákna se používá tvarový faktor (viz rovnice (7)), který lze vyjádřit z rovnosti obvodu elipsy a „deformovaného“ kruhu o ekvivalentním poloměru R_{VE} . Z rovnice (12) lze přímo vyjádřit tvarový faktor nakloněného vlákna:

$$q_E = \frac{1.5 \times \left(1 + \frac{1}{\cos(\beta)} \right) - \sqrt{\frac{1}{\cos(\beta)}}}{2 \times \sqrt{\frac{1}{\cos(\beta)}}} - 1 \quad (13)$$

Hodnoty parametrů P a Q lze pro kruhová vlákna odečíst z Obr. 9. Praktické určování sumárního parametru $H_{max}(n =)$ pomocí sdružování svazku obvykle nepřipadá v úvahu, protože by došlo ke změnám struktury a zaplnění. Sdružování přízí pro stanovení $H_{max}(n =)$ lze použít snad pouze u přízí s nízkým zákrutem a zaplněním, jejichž sdružením vznikly téměř homogenní útvary. Lze doporučit vzorec (10) platící pro vlákna nekruhového průřezu:

$$H_{max} = \frac{(1 + q_E) \times \left(\sigma_{LG} \times \cos(\Theta) \times 2 \times \mu - \left(\frac{2}{100} \times \sigma_{LG} \times \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \times (Q \times \cos(\Theta) + P) \right)}{R_{VE} \times (1 - \mu) \times g \times \rho} \quad (14)$$

kde R_V lze dosadit z (11) a q_E lze dosadit z (13).

Pokud vyjdeme z orientační hodnoty průměrného úhlu naklonění vláken v přízi pro bavlnářské příze cca 20°, pak vyjde $R_{VE} = 1.036 \cdot R_V$ a $q_E = 1.001$ (pro naklonění 30° by vyšlo: $R_{VE} = 1.077 \cdot R_V$ a $q_E = 1.004$). Změna průřezu vlákna způsobená jeho nakloněním v přízi je velmi malá. Tvarový faktor se změnil jen zanedbatelně málo – jeho vliv na sací výšku je nulový.

Na základě tohoto zjištění lze pro běžné příze vliv zákrutu zanedbat. Jediný vliv spojený se zákrutem, který se projeví na sací výšce, je změna zaplnění – více zakroucená příze má vyšší zaplnění.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory: Výzkumného centra „Textil“ (LN00B090).

ⁱ Pearson, J.: přednáška na TU Liberec, říjen 2000

ⁱⁱ Kamath, Y.K., Hornby, S.B., Weigmann, H.D., Wilde, M.F.: Textile Res. J. 64(1), 33-40 (1994)

ⁱⁱⁱ Wang Qi, Feng Xunwei: J. Of Dong Hua University, Vol. 27, No. 3, Jun 2001

^{iv} Wiener, J.: Vzlinání kapaliny do příze, konference STRUTEX 2000, Liberec

^v Malinowska: Inst. Wol. 1980

[Příloha 8]

Autoři: WIENER, J., DEJLOVÁ, P

Název: **Wicking and wetting in textiles**

Časopis: AUTEX Research Journal

Ročník: Vol. 3.

Číslo: No. 2, June 2003

Stránky: 64-71

The logo features the word "AUTEX" in a bold, sans-serif font. The letters are white with a dark outline. Surrounding the text is a circular arrangement of twelve five-pointed stars, also in white with dark outlines, reminiscent of the European Union flag. The entire logo is set against a dark, textured background.

AUTEX

*Association
of*

Universities for Textiles

WICKING AND WETTING IN TEXTILES

Jakub Wiener, Petra Dejlova
The Technical University of Liberec, Textile Faculty,
Hájkova 6, 461 17 – Liberec, Czech Republic

Abstract

Proposed model is based on the simplified description of the thread structure and it works with the textile description of thread structure. There are used these textile parameters in model: fineness of fibers, number of fibers at the cross-section in the bundle and the filling. There is detail described the formation of the liquid in the longitudinal textile, particular phenomena are discussed. Important parameters are used in model of wicking. The parameters with very small influence at usual threads are disregarded. Proposed model of wicking makes possible to express a functional dependence of suction height on parameters of fiber bundle in analytical form.

Keywords

wetting, wicking, liquid amount fibers, liquid surface

Wicking

The behavior of textile during its contact with water (generally with the liquid) is one of important properties of textiles. This work is intended on a spontaneous liquid wicking, which influences especially consumer properties of textiles. If the liquid rises (by absorption) in fabric – it can be used e.g. for liquid perspiration outlet from skin, for produce of hand towels and dishcloths, textiles for cleaning works... Wicking makes possible to use textiles even for series of special applications: wicks to the candles and lamps with oil or some modern flameproof finishing of housing textiles. [1] The spontaneous liquid wicking into the fabrics is not sufficiently theoretically examined till to this time. Wicking can be formally divided to the course and wicking result, in this work the equilibrium was analyzed so result of the process.

Equilibrium of wicking process is not sufficiently elaborated but at the same time on the equilibrium can be find series of phenomena which influence from practical standpoint more interesting dynamics of process. Most of authors comprehend the equilibrium of process only as a physical constant without statement value. It also frequently occurs neglecting of important factors from acknowledge of wicking specifications into textile formation (or from passive assuming of theories from other porous systems) and then results are weighted by useless error. [2] For analysis of wicking equilibrium is commonly used the relationships accepted for capillaries. Essential difference between classical capillary and fabric is that the capillary is "closed" and the textile fabric "opened" capillary system. From capillary the liquid do not flow out to all directions – solid walls opposed it. There are not firm walls in the textile fabric – the liquid in system is held by its surface tension.

Proposed model of the liquid wicking into the fiber bundle

This model was partially published. [3]

In this work the thread is a formation of sufficient length, with circular cross-section, with constant filling and without length weight variation. This formation can be: monofilament yarn, continuous filament yarn, tow... Synthetic filament yarn is the most experimentally suitable. With the wicking through the fiber bundle the liquid takes (in general case) shape drawn at the follow figure:

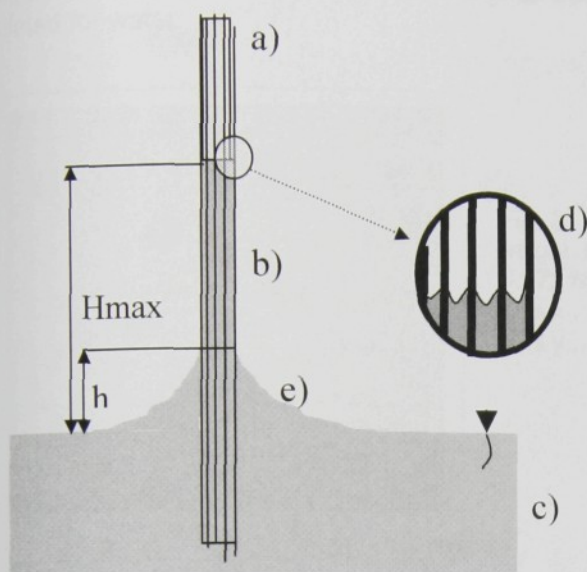


Fig. 1: General case of the liquid wicking into the vertical fiber bundle

- a) fiber bundle – the segment without liquid
- b) fiber bundle – the segment with liquid; at the equilibrium the liquid will rise to the maximum height H_{max} ; it is a main part of wicked liquid
- c) liquid
- d) the detail of liquid shape in contact with fibers at the height H_{max} (planar formation section) – upper region
- e) transient region (with maximum height h) among wetted fibers and a surface of the "distant" liquid

Result of wicking is depended on series of factors – for example factors, which influence interfacial tensions (temperature, pressure, impurities, polarity...), the rest of properties of liquid (viscosity, liquid evaporation...), fiber properties (surface articulation, fiber fineness...).

According to number of fibers, filling, interfacial properties etc. the separate segments of wicked formation (v. fig. 1) share a wicking equilibrium in a different degree. For usual textile threads (yarns, filament) the "main part" of formation has influence of principle to the suction height.

Main part

The liquid completes inter-fiber spaces and creates a formation with minimum energy. These conditions correspond to cylinder, which contains all wetted fibers. This cylinder has a surface created by liquid and partially un-wetted fibers. Concrete situation is depended on a hydrostatic pressure, cylinder radius, filling, fineness of fibers, interfacial tensions...

The foundation is a calculation of liquid surface curvature at the specific height above its free level. Previous the Laplace equation (2) can be simplified because the curvature in the direction of fiber axis is zero respectively the curvature radius is infinite:

$$P = \sigma_{LG} \times \left(\frac{1}{R_K} \right) \quad (1)$$

P relative pressure [Pa]

σ_{LG} surface tension between liquid and gas [$N \cdot m^{-1}$]

R_K curvature radius of liquid surface [m]

The hydrostatic pressure in liquid is compensated by pressure, which is provoked by curvature of the free liquid surface. On the basis of the Laplace equation the radius of curvature can be expressed for surface of main part:

$$R_K = \frac{\sigma_{LG}}{H \times g \times \rho} \quad (2)$$

g gravity acceleration [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$]

ρ liquid density [$kg \cdot m^{-3}$]

H height above free level [m]

σ_{LG} surface tension between liquid and gas [$N \cdot m^{-1}$]

So if we know a surface tension of the liquid and its density, it can be calculated what curvature the liquid surface will have at various heights above its non-curved surface. Following graph was calculated for water:

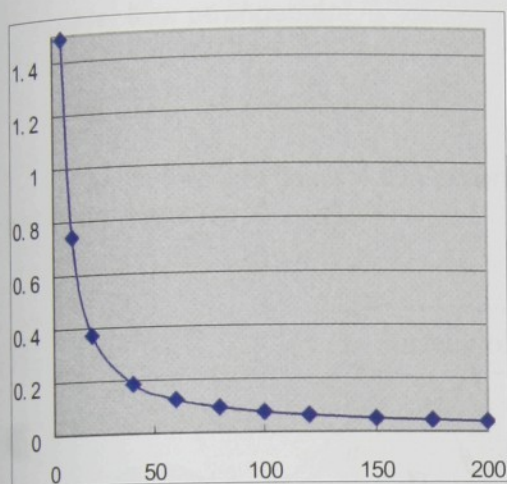


Fig. 2: Dependence of radius of level surface curvature on the height above its non-curved level for water (surface tension 0.073 N.m^{-1} ; density 1000 kg.m^{-3} , $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$)
axis x.....height above non-curved liquid level [mm]
axis y.....radius of liquid level curvature [mm]

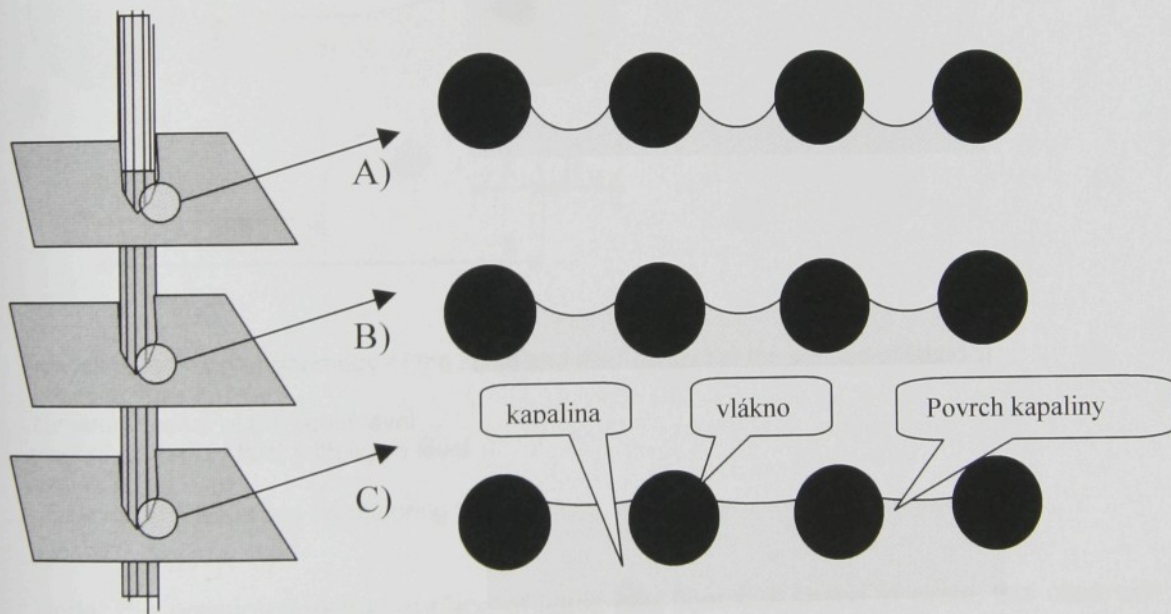


Fig. 3: Influence of hydrostatic under-pressure (or height) to the liquid surface curvature on the surface of fiber bundle

- A) the situation almost at the height $H_{\max}$ above free liquid surface – hydrostatic under-pressure is extremely high and that is why the curvature of surface is high – small radius of curvature makes possible to connect only very near fibers (high filling)
- B) intermediate stage between A) and C)
- C) the situation in small height above free liquid surface – hydrostatic under-pressure is low, that is why also the curvature of free surface of liquid is low (large radius)

Under the presumption of constant filling it can be deduced the relationship for average distance of fiber axes in the bundle:

$$a = k \times \sqrt{\frac{\pi \times R_v^2}{\mu}} \quad (3)$$

μfilling of the fiber bundle [-]

R_vradius of fiber [m]

l.....distance of axes of two neighboring fibers [m]
a.....distance of axes of two neighboring fibers [m]

For various fiber arrangements the coefficient k is different (in previous equation):
Layer fiber arrangement $k = 1.075$
Square fiber arrangement $k = 1$

At the followed figure 4 it is drawn liquid surface between two fibers at the surface of cylindrical part (v. fig. 1 and fig. 3).

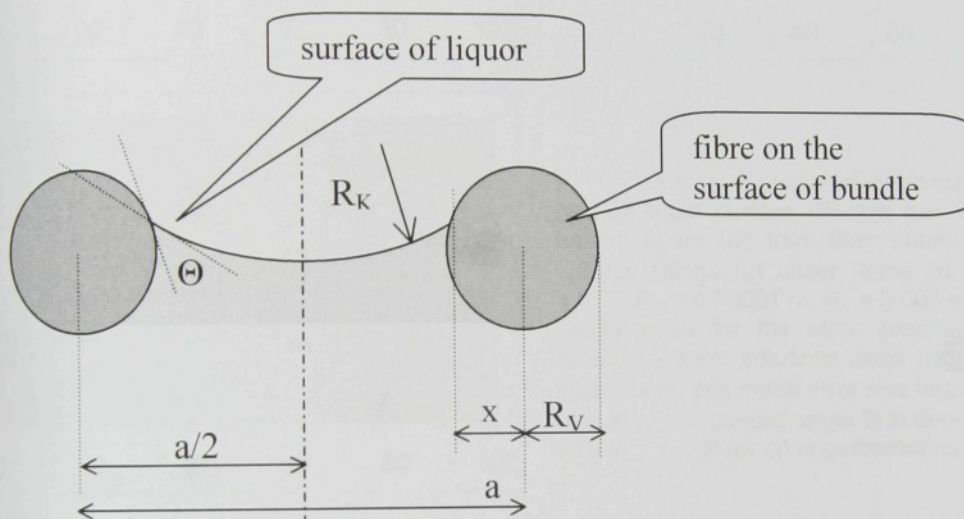


Fig. 4: The detail featuring of geometry of the liquid and fiber contact at the surface of fabric

R_V radius of fiber
 R_K curvature radius of the liquid level
 X point of contact of fiber with liquid level
 Θ contact angle
 a distance of axes of two neighboring fibers

Under the presumption that surface of liquid and fiber has shape of circle, this case can be easily solved if we know fiber radius and a curvature radius of liquid level. However the problem is to determine the point of contact X (v. fig. 4), which will accomplish requirements on the contact angle. This exercise do not make for a analytical solution but it can be numerically solved.

On the basis of calculations based by geometric considerations and calculated liquid surface curvature it can be said that the surface of fiber bundle with the liquid is created even from dry fibers even also a liquid.

From practical standpoint it is important how percent of bundle surface creates un-wetted surface of fibers (Q) and how percent creates a liquid (P). The ideal circle is considered as the bundle surface from which these percentages are calculated. Surface of bundle which is made partially by fibers and partially by liquid surface is larger, that is why the sum P and Q is larger than one hundred percent.

Values (P and Q) influence the process and wicking equilibrium and they can be calculated according with previous considerations or they can be experimentally determined – by analysis of wicking equilibrium for fiber bundles with different number of fibers and that is why even with different surface. Courses of values P and Q influences on the contact angle are plotted at the following diagrams.

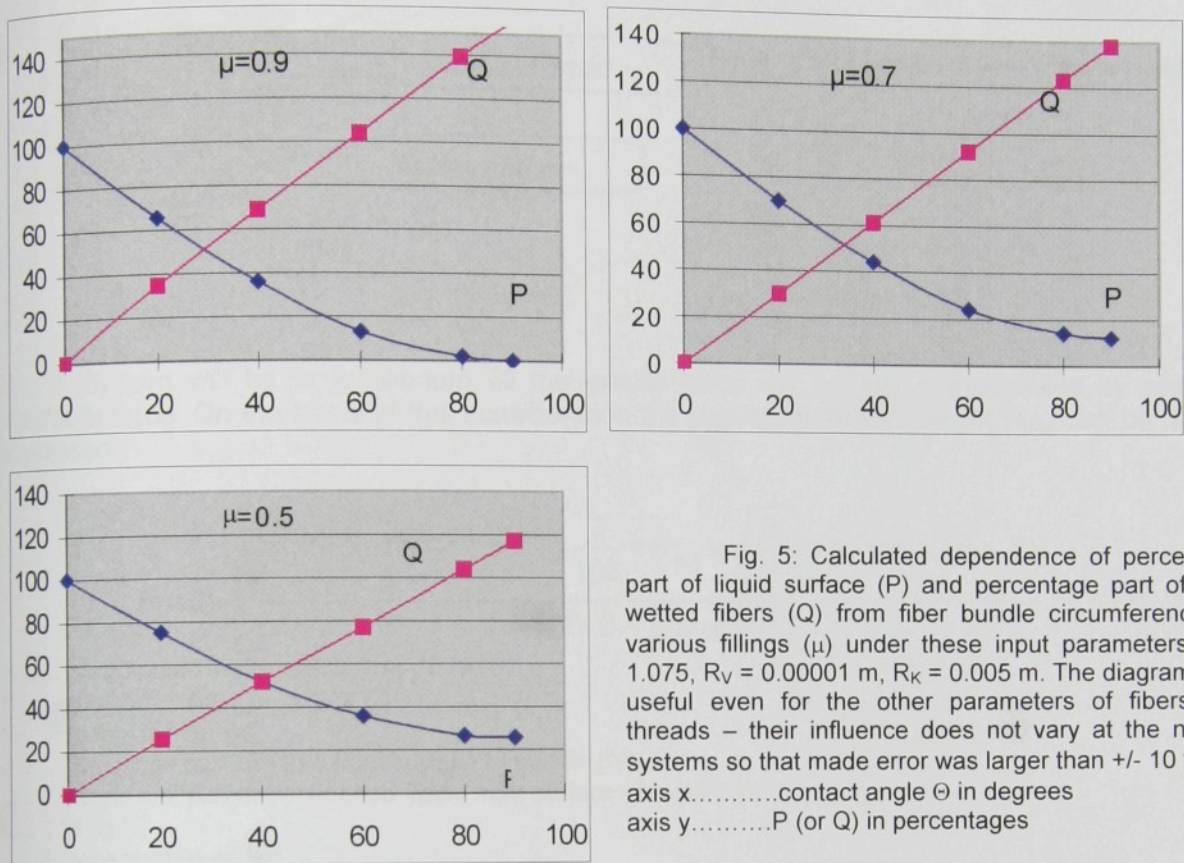


Fig. 5: Calculated dependence of percentage part of liquid surface (P) and percentage part of non-wetted fibers (Q) from fiber bundle circumference for various fillings (μ) under these input parameters: $k = 1.075$, $R_V = 0.00001$ m, $R_K = 0.005$ m. The diagrams are useful even for the other parameters of fibers and threads – their influence does not vary at the normal systems so that made error was larger than $\pm 10\%$.
axis x.....contact angle Θ in degrees
axis y.....P (or Q) in percentages

Radius of curvature of liquid surface does not influence values P and Q till the radius of curvature does not decrease to the orderly same value what the fiber surface has. This case would be occur at height of some meters (!) above free liquid level – it cannot be amount to this height at the real systems and that is why the values P and Q can be considered as a constant for one system “bundle of fibers-liquid”.

Calculation of suction height at the vertical bundle of the parallel fibers

It is valid for bundle of parallel fibers that the transient part and the upper part have only very small influence to the process and wicking equilibrium. Calculation of wicking equilibrium can be based on the equilibrium of forces at the section of the main part. At the point of maximum (equilibrium) suction height the interfacial force will be just compensated by gravity force.

Then at the section the interfacial tensions assert their self at these interfacials:

- between fiber and air (non-wetted segments of fibers)
- between fiber and liquid (wetted segments of fibers)
- between liquid and air (free liquid surface)

Phenomena described below decide about which part of fibers is wetted.

The realist illustration of section by wetted fiber bundle is presented by following figure:

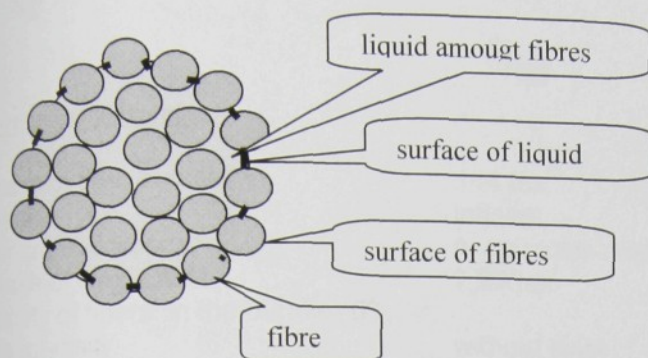


Fig. 6: Cross-section of yarn with the liquid

System will be in equilibrium till the gravity force will be just compensated by resultant interfacial force. On the basis of this consideration the maximum suction height $H_{\max}$ can be directly expressed:

$$H_{\max} = \frac{\sigma_{LG} \times \cos(\Theta) \times 2 \times \mu - \left(\frac{2}{100} \times \sigma_{LG} \times \sqrt{\frac{\mu}{N}} \right) \times (Q \times \cos(\Theta) + P)}{R_V \times (1 - \mu) \times g \times \rho} \quad (4)$$

$H_{\max}$equilibrium suction height [m]

Nnumber of fibers in bundle [-]

R_Vradius of fiber [m]

Ppercentual part of liquid from surface of bundle [%]

Qpercentual part of non-wetted fibers from surface of bundle [%]

μfilling [-]

ρdensity of liquid [kg.m^{-3}]

σ_{LG}interfacial tension liquid-air [N.m^{-1}]

Θcontact angle [-]

Note: In hypothetical situation when the number of fibers in bundle is infinite and surface of bundle does not exist, all fibers in section of fibers bundle would be wetted. The suction height for this case proceeds:

$$H_{\max}(n = \infty) = \frac{\sigma_{LG} \times 2 \times \cos(\Theta) \times \mu}{R_V \times g \times \rho \times (1 - \mu)} \quad (5)$$

$H_{\max}$ equilibrium suction height in bundle with infinite number of fibers [m]

N number of fibers in bundle [-]

R_V radius of fiber [m]

μ filling [-]

ρ density of liquid [kg.m^{-3}]

σ_{LG} interfacial tension liquid-air [N.m^{-1}]

Θ contact angle [-]

If we want to use this simplified formula, certain minimum number of fibers must be in the bundle. With the presumption that the deviation of 10 % between $H_{\max}$ and $H_{\max}(n = \infty)$ will be accepted, the maximum number of fibers in bundle is given by this formula:

$$N = \frac{1}{100 \times \mu} \times \left(Q + \frac{P}{\cos(\Theta)} \right)^2 \quad (6)$$

for case that $\mu = 0,5$, $\Theta = 80^\circ$, ($P=25$ a $Q=120$) proceeds $N = 50$

for case that $\mu = 0,9$, $\Theta = 80^\circ$, ($P=0$ a $Q=140$) proceeds $N = 200$

for case that $\mu = 0,9$, $\Theta = 20^\circ$, ($P=65$ a $Q=35$) proceeds $N = 200$

Fibre in experiments

finesse of fiber bundles:	144 tex
Fibers:	infinite
fiber cross-section:	noncircular- trilobal
finesse of single fiber	2,27 tex
quantity of fibers in the bundle: 63	
twist intensity	without twist
shape factor:	0.5



Fig. 7: Cross-section of used polyamide fibers - magnification 400x

Experiment

For the testing of wicking is usually used Czech national norm ČSN 80 08 28, which can quantify suction into the fabric. In this norm is used as a wicked liquor water, but for our experiments we used mixture water-isopropylalcohol (in weight ratio 90:10). This liquor has lower surface tension a wetted all fibers – hydrophilic and hydrophilic fibers as well.

As a dyestuff for visualization of suction we used Astrazon Rotviolett FRR in concentration 0.5 g/l. This solution is not unhealthful and it is very easy to see to surface of liquid in the fiber structure.

Evaporation occurs by the fiber bundles and this process has influence on the suction height. This phenomenon was minimalised – all our experiments were realized in the closed systems with relative humidity near 100%. Textile material was 2 hours climatized before the measurement.

Sample of experiments - Influence of number of fibers in the bundle on the suction height

The number of the fibers at their cross-section is one of important thread parameters – the suction height changes with the changing number of the fibers. If we will go out from presumption that all others parameters of system are constant, it can be obtained the following formula:

$$H_{\max} = k_1 - k_2 \times \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (7)$$

This relation can be used for verification of value of some parts of this model by linearization.

Theoretical solving based on the tested model:

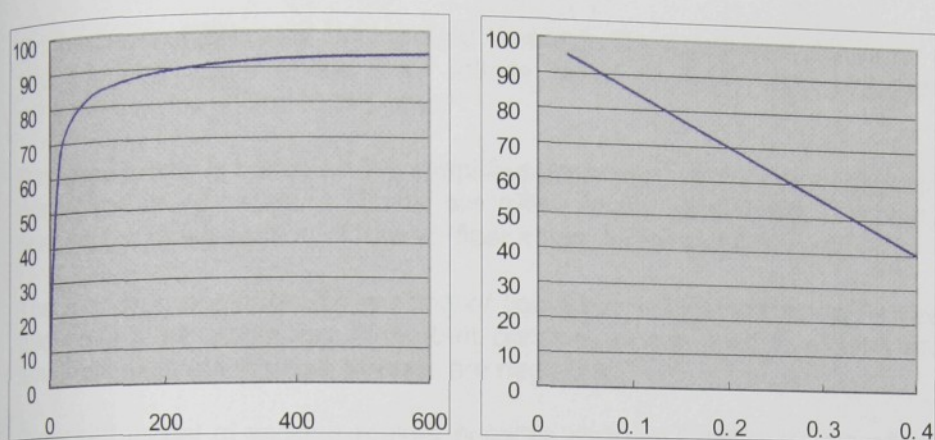


Fig 8: Influence of suction height (in the infinity time) on the number of fibers in the bundle (all others parameters of experiment are constant) – theoretical results

Left: axis x – number of fibers in the bundle /-/, axis y – suction height /mm/

Right: linearization of dates from the left side: axis x – $1/(\text{square root of number of fibers in the bundle})$ /-/, axis y – suction height /mm/

Experimental results are similar:

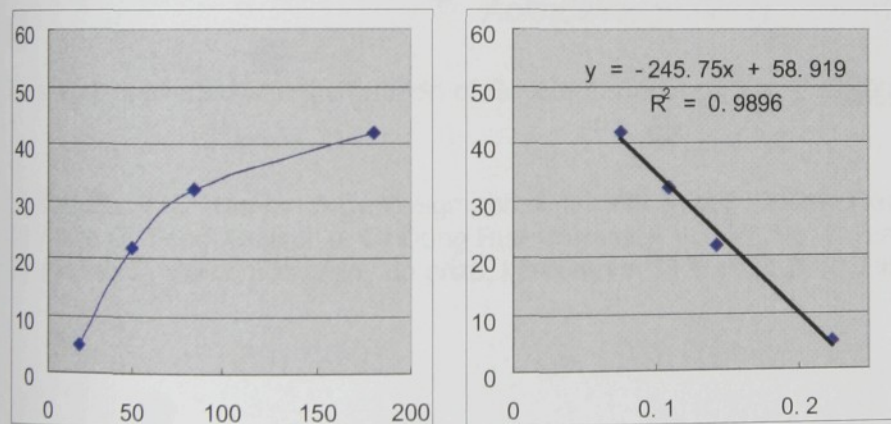


Fig 9: Influence of suction height (in the infinity time) on the number of fibers in the bundle (all others parameters of experiment are constant) – polyamide filament yarn, fibril fineness 2,27 tex, non-circular cross section - experimental results

Left: axis x – number of fibers in the bundle /-/, axis y – suction height /mm/

Right: linearization of dates from the left side: axis x – $1/(\text{square root of number of fibers in the bundle})$ /-/, axis y – suction height /mm/

Conclusion

On the basis of executed background research, the equilibrium model for spontaneous liquid wicking into the longitudinal textile from infinite liquid reservoir was proposed. This problem was not comprehensively solved to this time.

Proposed model is based on the simplified description of the thread structure and works with the textile description of its structure. There are these textile parameters in model: fiber fineness, number of fibers at the cross-section of thread, fiber shape factor and the filling.

The formation originated by wicking of liquid into longitudinal textile is described in detail - separate phenomena are discussed. Important parameters are used in wicking model. Parameters with very small influence at the usual threads are neglected.

Proposed model of wicking makes possible express functional dependence of suction height on the thread parameters in analytical shape.

Experimentally was tested influence of the number of fibers in the cross-section of the bundle. Influence of tested parameter was analyzed by well-arranged linearizations.

This work would be basic study for the future system, which will make possible to prediction of wetting of multidimensional textile formations under the real conditions.

Acknowledgements

This work originated with the support of Research Centrum "Textil" (LN00B090).

- [1] Kamath, Y.K., Hornby, S.B., Weigmann, H.D., Wilde, M.F.: Textile Res. J. **64**(1), 33-40 (1994)
- [2] Wang Qi, Feng Xunwei: J. Of Dong Hua University, Vol. 27, No. 3, Jun 2001
- [3] Wiener, J.: Vztahy kapiliny do praxe, konference STRUTEX 2000, Liberec

[Příloha 9]

Autor: WIENER, J., DEJLOVA, P.

Název: **Water in sloping thread**

Konference: 10. Conference Strutex

Konaná: prosinec 2003, Liberec

Stránka: 323-329

ISBN: 80-7083-769-1

Fakulta textilní
Technické univerzity v Liberci
a
Česká sekce Textile Institute Manchester

STRUTEX

Struktura a strukturní mechanika textilií

Structure and Structural Mechanics of Textile Fabrics



The Textile Institute

10. mezinárodní konference
10th international conference

2003

STRUTEX

10th International Conference

TU Liberec, December 2003

WATER IN SLOPING TREAD

Wiener Jakub¹, Dejlová Petra²

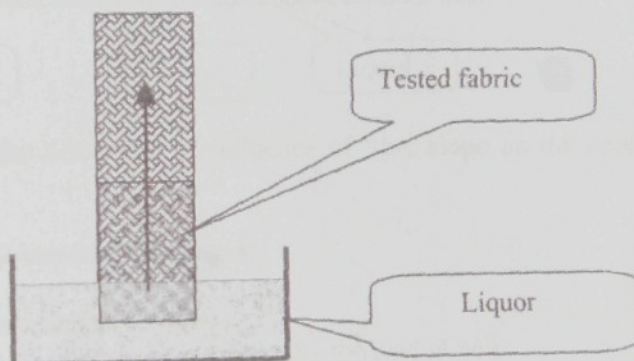
Abstract:

Wicking of liquor into the fabric is from a practical and theoretical point of view very important process. In this study is described wicking (suction of liquor) into a sloping thread. This experimental arrangement coheres with the wicking into a fabric – here is the thread anytime sloping as well. Experimental results are discussed and compared with new models. Kinetics of processes is analyzed by modified Lucas-Waschborn-equation. The equilibrium of process is analyzed by forces and geometry in the system.

1 Introduction

Wicking of liquid into the fabrics is a very complicated problem. The possibility of prediction of a liquid wicking into the fabric could make possible the suggestion of fabrics with demanding characteristics without exact experiments.

Threads are not simple systems and fabrics are much more complicated. The threads in fabrics have deformed cross-sections and they are sloping. The sloping of treads is separated solved in this study.



2 Wicking into the sloping yarn

From the average of absolute inclined angle is possible to model the situation of macroscopic sloping yarn.

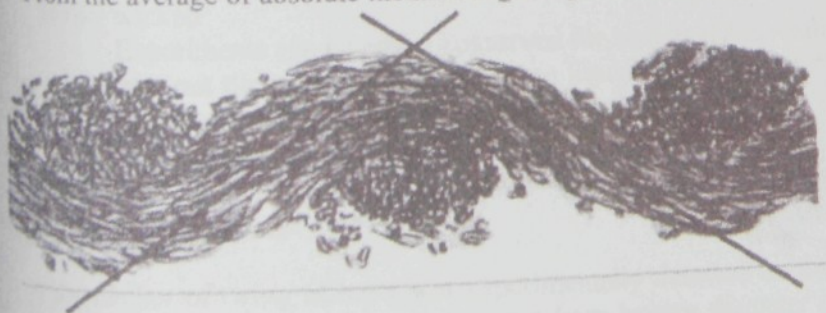


Fig. 1:
Microphotography of
fabric cross-section
(KTM – TU Liberec)

¹ Ing. Jakub Wiener, Ph.D., Technical University of Liberec, Czech republic, jakub.wiener@vslib.cz
² Ing. Petra Dejlová, Technical University of Liberec, Czech republic

2.1 Influence of the thread slope on the equilibrium suction height

In this partial study the experiments were made with PA thread. As it was initially planed, silk could not be loose-strained in space under definite angle. In this experimental arrangement the thread in linear form occurred and it was difficult to detect the defined initial tension.

„The slope“ of fibers was realized by reeling of thread onto the transparent cylinder carrier, experimentally was used a test tube of bigger diameter (18,5 mm). (See Fig 2) Tension in the tread was constant at all cases – it was given by mass of weight on the end of twisted thread.

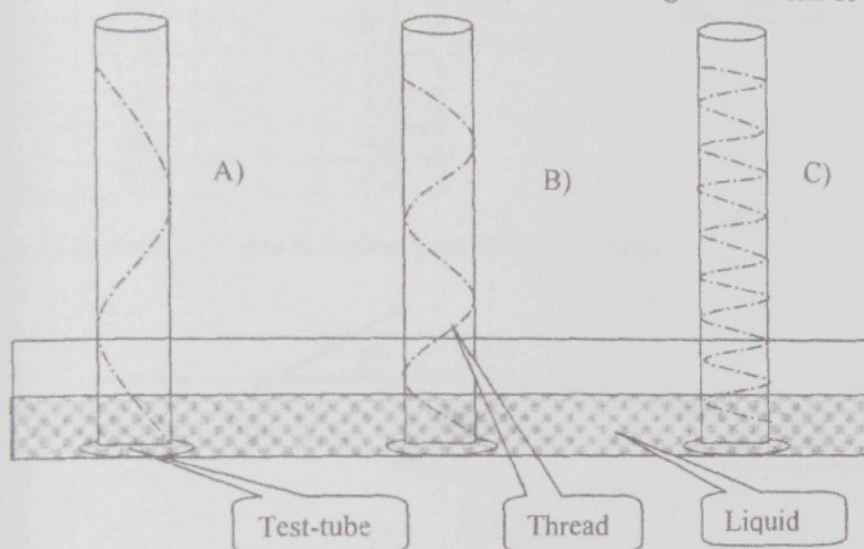


Fig. 2: Experimental arrangement for determine of influence of fiber slope on the suction height

This experimental arrangement has following advantages:

- Thread is in a linear form
- There is well-defined initial tension at the fibers
- It can realized various slopes of fibers at broad limits by the lead of helix
- Test tube with twisted thread is „unitized“ – it does not need any added holder or carrier
- By contact of thread with the glass the evaporation of liquid from thread surface is limited (unfortunately the glass is very wetted material and it can vary the suction height of silk)
- Test tube is transparent and so it can be easily detected to which height the liquid wicked
- Experiments can be easily conserved for next analysis – after ending of experiment we take out the test tube with silk from liquid and we dry it, the dye in the liquid makes possible to detect the suction height even later

Geometry of sloping:

The number of twists of helix was experimentally detected on the active length of test tube. The angle of silk slope can be calculated from known diameter of test tube and data above mentioned.

Number of twists	Length of test-tube	angel beta	W
	mm	°	mm/mm
0	100	90	1,0
3,5	150	49	1,3
5	125	34	1,8
8,5	100	18	3,3
11,5	135	18	3,3
15	150	15	3,8
16	127	12	4,8
19,5	150	12	4,9
22	100	7	8,2

Tab 1 – Demonstration of some realized experiments including counts

W.... Indicates which length of fiber bundle accrues to length unit in vertical direction

Beta.... Angle of fiber declination at degrees (see following figure)

Angle of declination (beta) is evident from following figure:

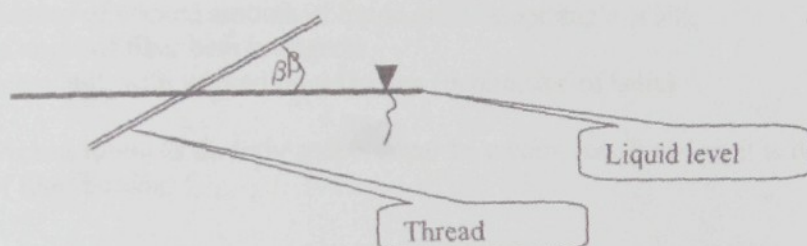


Fig 3: Slope angle of thread beta

Equilibrium suction height did not depend on used lead of helix (declination of thread) in broad limits – in all realized cases the suction height was nearly constant (if the initial tension, surface tension of liquid etc. did not change). Different (lower) suction height can be recorded only at fibers with strong declination – they contain an angle less than 10° with free liquid level. This result is apparent from the following demonstration diagram.

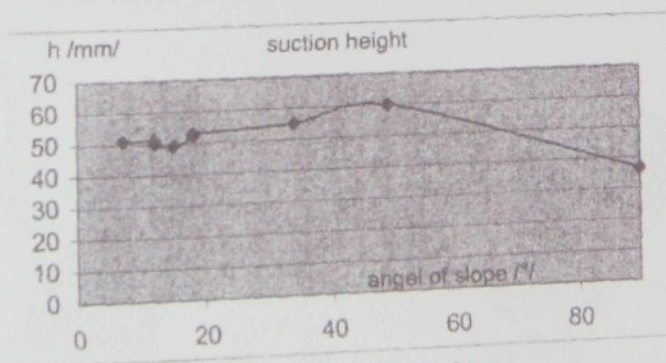


Fig 4. : Dependence of suction height on angle of silk slope
 Axis x: Slope angle of fiber beta in degrees
 Axis y: Suction height in mm (in vertical direction)

Bundle of fibers was wetted in the different length by wicking (below: length of wicking). Experiments viewed at form of suction heights (Fig 4) can be transferred on suction heights on the basis of geometry ideas (Fig 5).

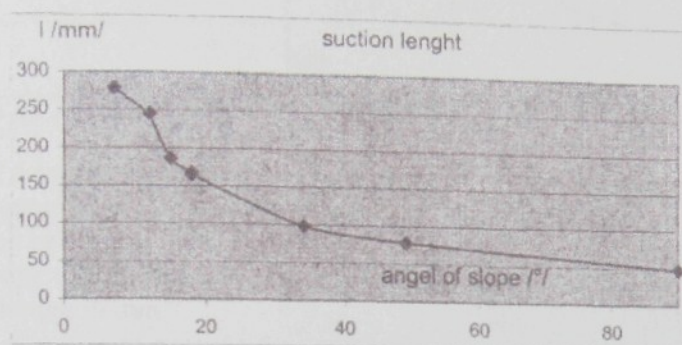


Fig 5: Dependence of wicked amount of liquid on the slope angle of silk

Axis x: Slope angle of fiber beta in degrees

Axis y: Length of silk with wicked liquid in mm (in direction of helix)

Amount of wicked liquid is directly proportional to suction length and so it is depended on slope angle of fiber bundle.

Model:

The force in fiber surface direction, which rising by action of interfacial forces on the air-liquid-fiber interface decides to equilibrium of wicking.

The force that pulls up the liquid into the fiber system (in general it causes all capillary effects) is depended only on the geometry of contact, with constant parameters of fiber and liquid surfaces.

At declination of fibers with liquid in the inter-fiber spaces it can place some geometrically different shapes of contact:

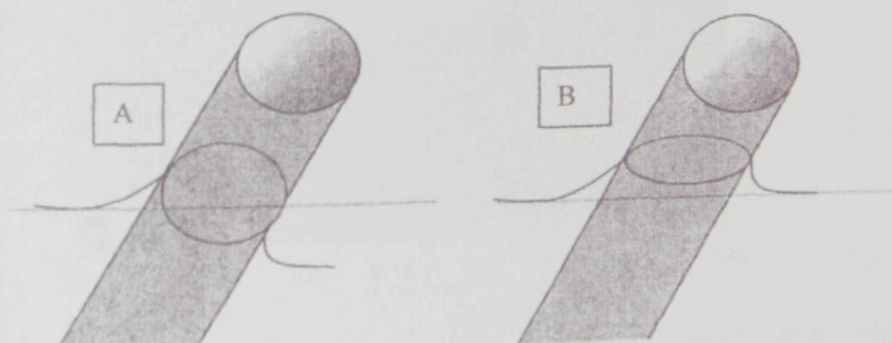


Fig 6: Different variants of contact of liquid level with tilted fiber

- A) Contact of level surface with fiber creates the circle
- B) Contact of level surface with fiber creates the ellipse

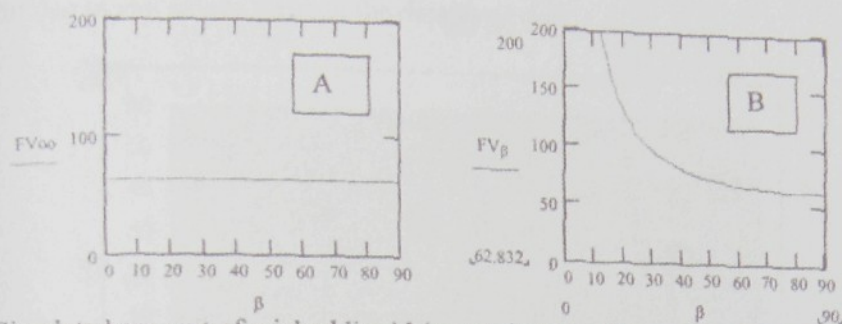


Fig 7: Simulated amount of wicked liquid (or suction length) on the slope angle of fibers -

A) For situation at Fig 6A

B) For situation at Fig 6B

Axis x ... Slope angle of thread in degrees

Axis y ... suction length in mm

The power in direction of axis of fiber decides about amount of wicked liquid (or suction length).

The variant B) is in accordance with experiments (Fig 6B and 7B) therefore it will be worked with this model furthermore.

Following linearization is usable for broad scale of parameters:

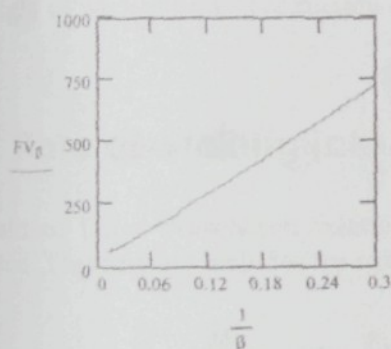


Fig 8: Linearization of dependence from diagram 6B

Axis x...Reciprocal value of thread slope in degrees

Axis y...Suction length in mm

For linearization, following equation was used:

$$m = a \times \frac{1}{\beta}$$

Comparison of experimental data with approximation model:

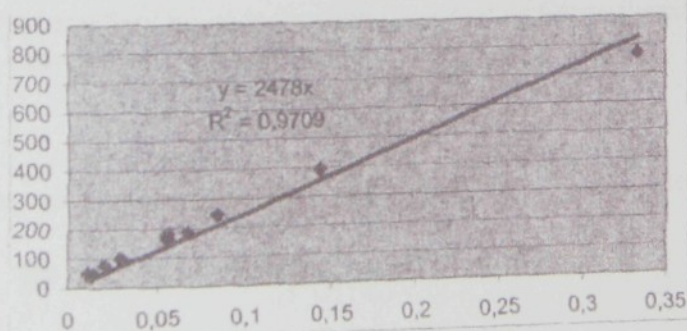


Fig 9: Linearization of experimental data – suction length (it correspond with weight of wicked liquid) as a function of declination of fiber bundle

Axis x ... Reciprocal value of thread slope in degrees

Axis y ... Suction length in mm

It is evident that model passes through the data very well.

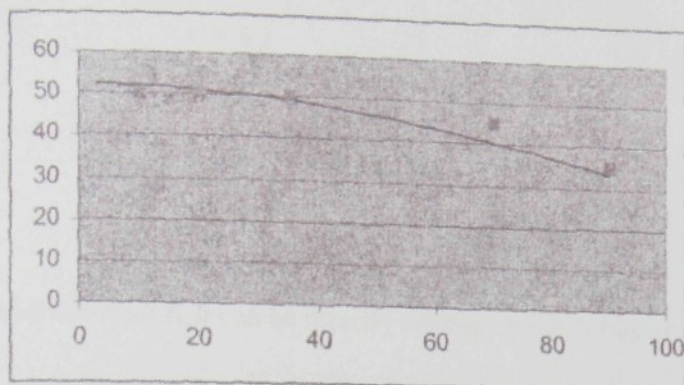


Fig 10: Suction height as function of declination of fibers
 Axis x: Slope angle of bundle of fibers (see Fig 3) in degrees
 Axis y: Suction height in mm

Suction height is only loose depended on the declination of fibers. See Fig 10.

Weight of wicked liquid (or suction length) is highly depended on the slope of fibers.
 See Fig 7.

3 Rate of wicking into the inclined threads

Modified Lucas-Waschborn relation is suitable for dynamics of wicking in the inclined thread. This relation includes the extension of „capillary“ by inclination of yarn:

$$\int_0^H \frac{H}{H_{MAX} - H} dH = \frac{R \cdot R \cdot g \cdot l \cdot \rho}{8 \cdot k \cdot \eta} \quad (1)$$

k ... „extension“ of capillary by its inclination (length of capillary divided by high of upper point of capillary above free liquid level)

For analysis of experimental data it is possible to directly use the integrated form of equation (1)

$$-H - H_{MAX} \cdot \ln\left(\frac{H_{MAX} - H}{H_{MAX}}\right) = \frac{R^2 \cdot g \cdot l \cdot \rho}{8 \cdot k \cdot \eta} \quad (2)$$

From this equation, as it was said before, it cannot be express the suction high H as function of time. Easy linearization is an important possibility:

$$y = K \cdot t \quad (3)$$

where:

$$y = -H - H_{MAX} \cdot \ln \left(\frac{H_{MAX} - H}{H_{MAX}} \right) \quad (4)$$

$$K = \frac{R^2 \cdot g \cdot \rho}{8 \cdot \eta \cdot k} \quad (5)$$

From experimental constant K it can be directly calculated the radius of capillary R :

$$R = \sqrt{\frac{8 \cdot K \cdot \eta \cdot k}{g \cdot \rho}} \quad (6)$$

Results:

Wicking under observed experimental conditions was very speedy – process achieved of ninety percents of equilibrium state during a few minutes.

High inclination of thread led to slow increase of liquid level in the thread.

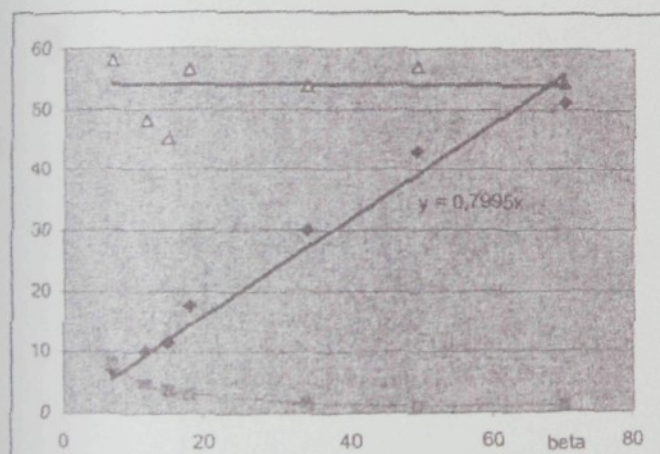


Fig. 11: Results of wicking dynamics into the sloping tread

Axis x ... angle of slope of thread (beta) toward horizontal level

Diamond ... K ... parameter from linearization of experimental kinetics

Square ... k ... „extension“ of capillary by its inclination (length of capillary divided by high of upper point of capillary above free liquid level) – calculated from geometry of experiment

Triangle ... product $k \cdot K$ (by model (14) it does not depend on the angle of thread slope)

Rate of wicking into the inclined threads is depended on their slope.

4 Acknowledgments:

This work was created with support: “Výzkumné Centrum Textil” LN00B090

[Příloha 10]

Autoři: WIENER, J., BINĚDOVÁ, M., KANG, Z. S

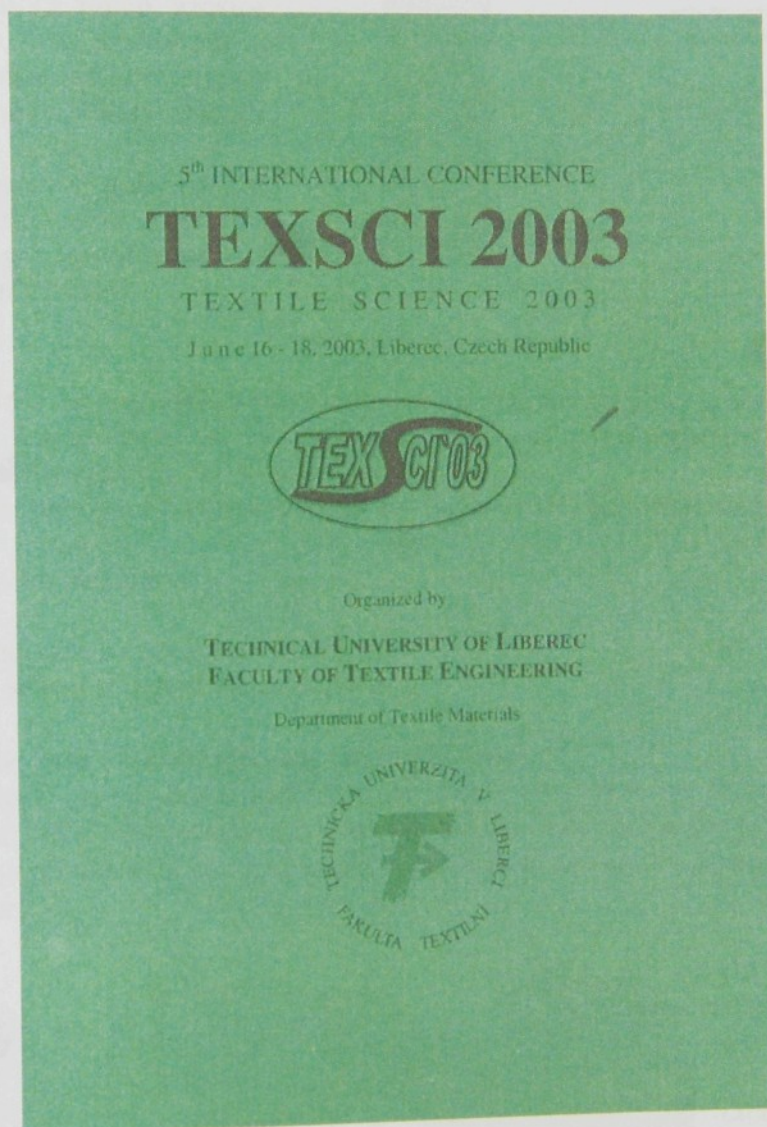
Název: **Capillary Rise in Fabrics**

Konference: 5th International Conference Textile Science 2003

Konaná: 16.-18. červen, 2003, Liberec

Stránky: 207-210

ISBN 80 – 7083-11-X



CAPILARY RISE IN FABRICS

Jakub Wiener*, Marcela Binědová*, Zhu Sukang**

*Department of textile finishing, Technical University of Liberec

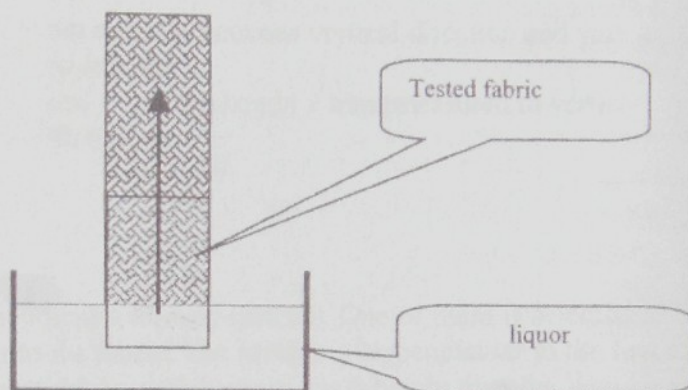
**Dong Hua University, Shanghai, China

Wicking of liquid into the fabrics is a very complicated problem with a big significance. The possibility of prediction of a liquid wicking into the fabric could make possible the suggestion of woven fabrics with demanding characteristics without exact experiments.

Solved situation:

The equilibrium of liquid wicking into the fabrics from the threads is solved in the plane of both threads systems from the endless storage. See the picture.

The experiments were made with the woven fabrics, most of the considerations are possible to use also for the knitted fabrics.



The situation in the fabrics is much more complicated than the situation in the length fabric. The wicking into the fabrics can be solved stepwise by solving of partial separated effects:

- wicking into the free yarn in the vertical direction
- wicking into the free yarn inclined towards the liquid level (the model –orientation of an yarn in the fabric)
- wicking into the model fabric

Wicking into the yarn in the vertical direction

This problem is solved in details for example in ¹.

Wicking into the yarn inclined towards the liquid level

From the sectional view of fabric and from the simple considerations about fabric results the main geometrical difference between the free yarn and the fixed yarn in the fabric is their sag. From the average of absolute inclined angle is possible to model the situation of macroscopic inclination of yarn.



Fig. 1:
Microphotography of
fabric cross-section
(archiv KTM – TU
Liberec)

Based on experiments and the theoretical analyses made by Wienerⁱⁱ can be said, the equilibrium suction height does not change with the inclination from the vertical direction.

The different (lower) suction height we can note only by the significantly inclined fibres – they contain an angle less than 30° with the free liquid level. See the graph.

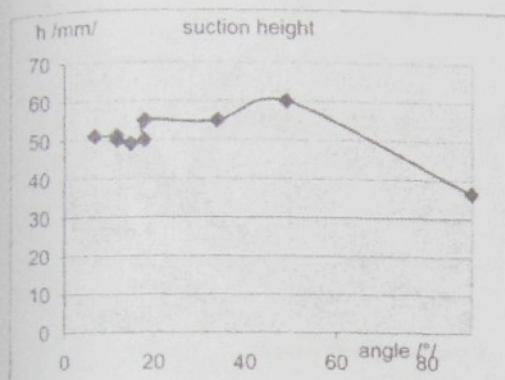


Fig 2 : Wetting of decline yarn
(Experimental results)

osa x: angle between vertical direction and yarn axis in degrees
osa y: suction height v mm (measured in vertical direction)

Wicking into the model fabric

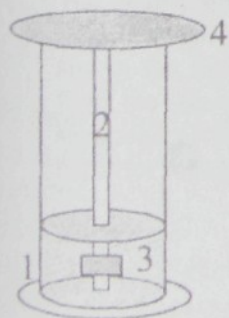
The model fabric: the fabric has 2 perpendicular threads systems. One of them is oriented in the wicking direction and leads the liquid into the fabric. The second is perpendicular to the first and leads the liquid into up to now dry parts of fabric, which are in given height over the liquid level. It is easy to make a numeric model of this situation and use it for the prediction of structure influence upon the dynamic of wicking. Next application of the model is an explanation and prediction of dynamic of partially and fully humid fabric during the wicking.

Experiments

The experiments were made with 6 fabrics (in 4 cases cotton and 2 cases PES fabrics). The used has been isopropanol-water in the specific weight ratio 20/80. This liquid easily wets most of the textile materials. That is why we can get the results also for hydrofobic materials.

Experimental arrangement:

The temperature was 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). This fluctuation did not have an influence on the suction height. The evaporation of liquid has been eliminated, all experiments proceeded in an environment with relative humid close to 100 %. The material has been climatized in the environment 2 hours before the experiment.



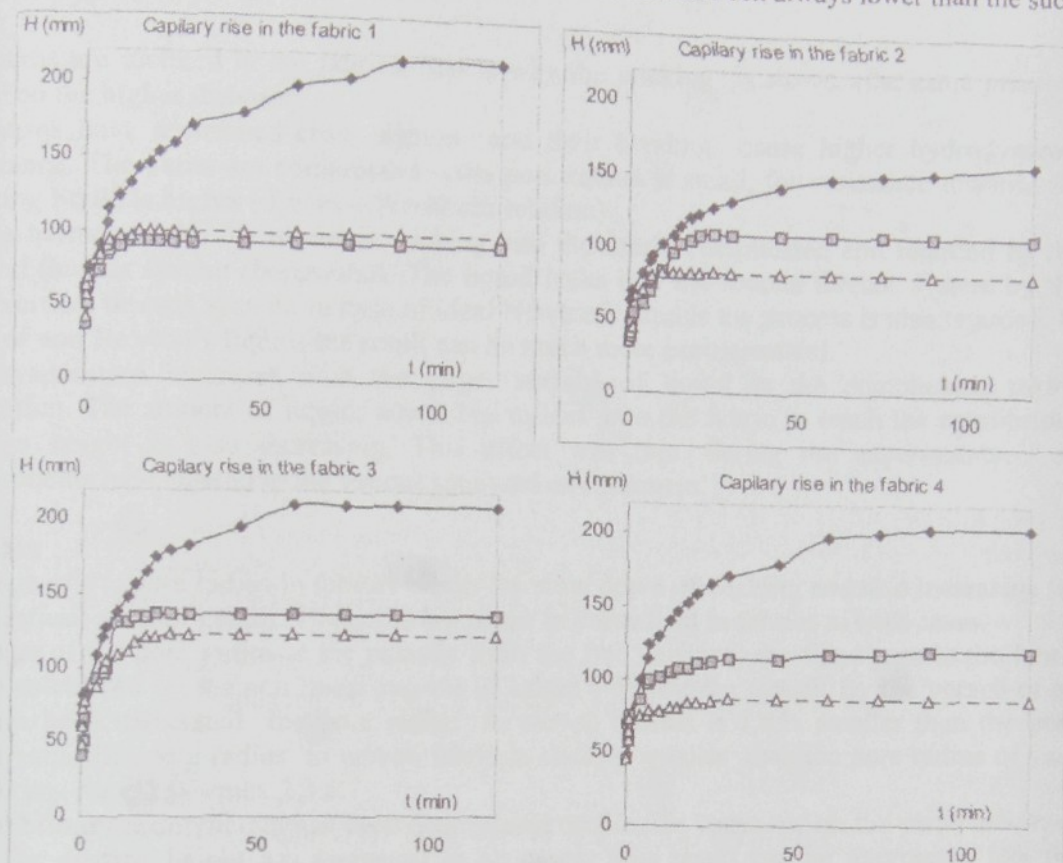
The textile was located into the holder according next diagram:

- 1 ... glas tube – height 250mm
- 2 ... tested textile with weight
- 3 ... tested liquor – solution of dyestuff
- 4 ... snap against of fading of vapor from tube and a holder of yarn

The suction height has been read visually – The coloured testing solution can be easily detected on the white fabric.

The equilibriums suction height

The equilibriums height of yarn separated from the fabric has been always lower than the suction



height of the fabric (in the direction of separated yarn). See next 4 graphs.

The general justify and discovering of a function dependence between the suction height into the yarn and fabrics is not easy.

The yarns are compressed in the fabrics – by higher filling and smaller pore radius and then also by higher suction height. The increasing filling of yarn is more visible on the low filled yarn and on the high filled fabrics.

The biggest effect can be reached by the combination of those two factors. By low dense fabric made from sharply twisted yarns with low filling we can expect the suction height in the yarn and in the fabric will be approximately the same. On the contrary, by very thick fabric made from the strain yarns, the suction height will be much higher in fabric (often twice) than in separated yarns. The quantification of the process is complicated. The insufficient description of behavior (changes) of the yarn in the fabric is the main problem of this purpose.

The speed of wicking:

As we can see on the pictures above the wicking into the fabrics is significantly slower than wicking into separated yarns.

Reasons:

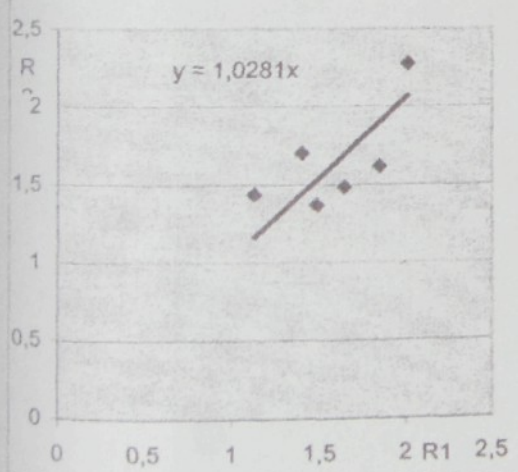
- the yarns are inclined in the fabrics, that is why the wicking is slower (the same pressure slope on the higher distance)
- the yarns have a strained cross section and their bending cause higher hydrodynamic resistance. The yarns are compressed – the pore radius is small, the resistance towards the wicking liquid is higher (Lucas – Washburn relation)
- in the harmony with the model is wicking into the fabric complicated and retarded by the second threads system (horizontal). The liquid leaks into the second threads system by the first vertical threads system. In case of ideal Newton's liquids the process is also retarded. In case of non Newton's liquids the result can be much more problematical.
- the evaporation increases with the larger surface of liquid in the complicated textile formation. The amount of liquid, which has to leak into the fabric to reach the equilibrium suction height is also increasing. This effect was min. during the experiments – all experiments have passed in the vapour saturated environment.

Conclusion

The change of the pore radius in fabrics brings the slow down of wicking and also increasing of the equilibrium suction height. The pores are larger in yarns than in fabrics in both cases.

The change of the pore radius at the passage from the free yarn into the fixed yarn in the fabric has been calculated by the non linear regress of Lucas – Washburn model. By the verage of all results has been calculated the pore radius in woven fabrics is 1,65x smaller than the pore radius in yarn. The pore radius in woven fabric is always smaller than the pore radius of yarn in the fabric – max. 2,0 – min. 1,1x.

The equilibrium suction height has been determinate on the free yarns and on the yarns in woven fabrics. The suction height has increased in all cases. This result can be interpreted like the degreasing of pore cross-section in yarn, which has been implemented into the woven fabric.



By the average of all results has been calculated the pore radius in woven fabrics is 1,65x smaller than the pore radius in yarn. The pore radius in woven fabric is always smaller than the pore radius of yarn in the fabric – max.2,0 – min. 1,1x.

The changes of pore radius (R2) amongst the fibres have been calculated from the suction height. It is very close to changes of the pore radius (R1). R1 has been determinate from the dynamic of wicking. The relation of those two independent relative changes of the pore radius can be seen on the picture (on left site).

ACKNOLEDGEMENT: This Work was supported by Centrum Textil (LN00B090).

¹ Wiener, J., Dejlová, P.: Rovnováha vzlinání do nitě, 9. International conference Strutex 2002, December 2002, Liberec

² Wiener, J.: Vzlinání kapaliny ve svazku vláken, 7. National conference Strutex 2000, December 2000, Liberec

[Příloha 11]

Autoři: WIENER, J., DEJLOVÁ, P.

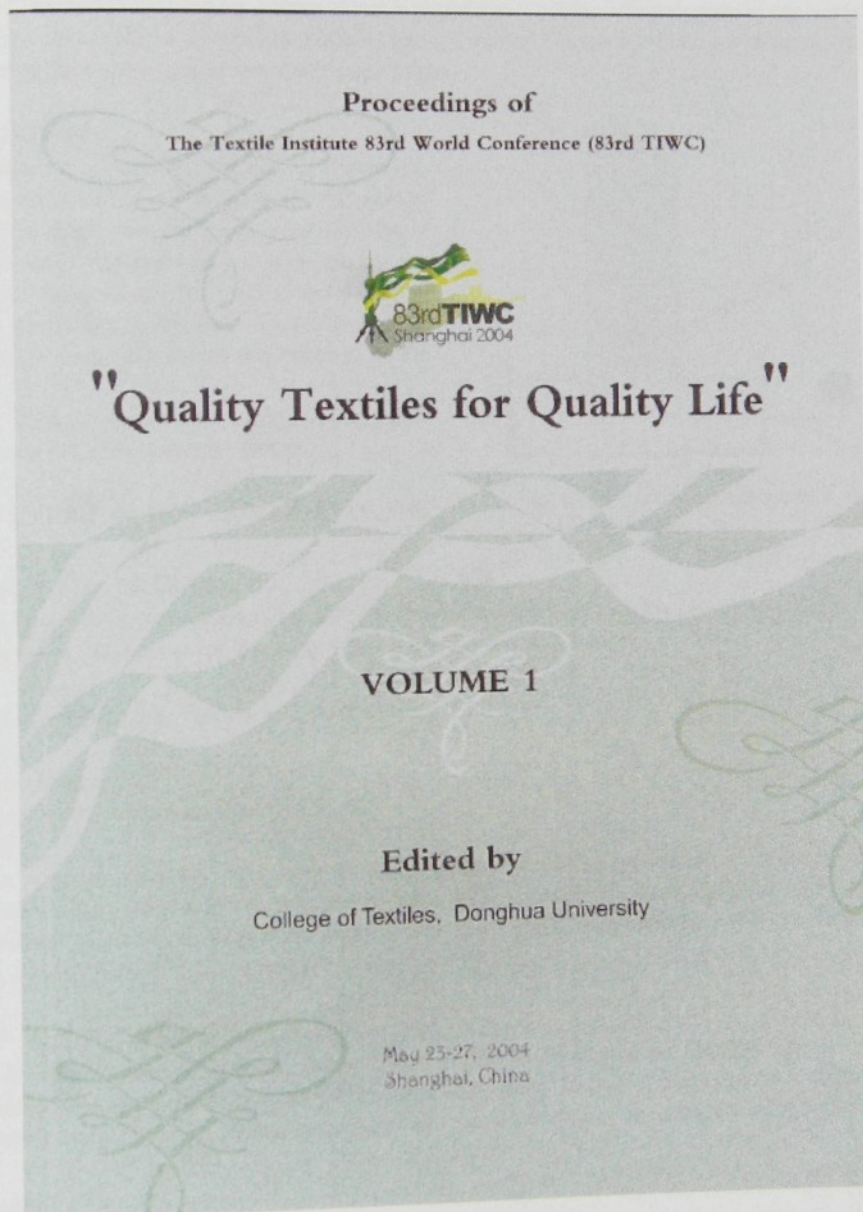
Název: **Capillary Rise in Fabric**

Konference: 83rd TUWC

Konaná: 23.-27. května 2004, Shanghai, Čína

Stránky: 473-476

ISBN 1870372611



Proceedings of The Textile Institute 83rd World Conference (83rdTWC)
May 23-27, 2004, Shanghai, China

Wiener

CAPILLARY RISE IN FABRIC

J. Wiener and P. Dejlova

Textile faculty, Technical university of Liberec, Liberec 461 17, Czech Republic

ABSTRACT

A new model of fabric, which is designed for wetting of textile structures in fabric, was proposed in this work. This model is based on simple geometrical ideas. Presented model of fabric structure can explain behavior of liquor by wicking into the fabric. Experimental data are in accordance with these ideas.

1 SOLVED SITUATION

Wicking is the spontaneous penetration of liquid into the textile, which is provoked by capillary forces. In this work, the wicking of liquid into the vertical fabric from infinite reservoir (volume of liquid in the reservoir does not practically change during the experiment) is solved. Fabric is oriented so that one system of thread (for example warp) lies in direction of wicking and the second (e.g. weft) is perpendicular to the direction of the wicking.

The fabric studied here is textile with plain weave, both systems of their threads have the same properties.

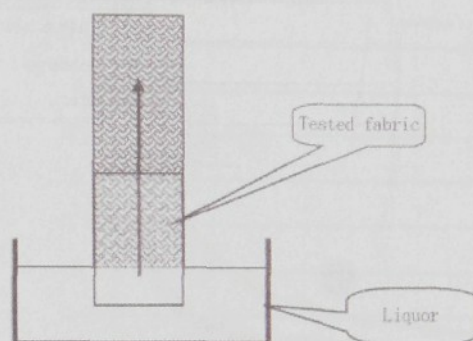


Fig. 1 Experimental arrangement for solving of problem

2 WICKING OF LIQUID IN THE YARN AND IN THE FABRIC

2.1 Water in Fabric Can be Divided on

- Water in the yarn (content of water does not practically depend on the height above non-curved liquid level)
- Water among the yarns (it depends on the height above non-curved liquid level)

2.2 Wicking of Liquid into the Textile is Influenced by

- Properties of yarn
- Slope of the thread in fabric
- Distribution of liquid to the horizontal system of thread
- Inter-yarn spaces

In fabric, the yarns exist in deformed form and its deformation cannot be realistically calculated. Generally two deformations take place: deformations of yarn axis to the shape approximately sine wave and deformation of yarn section by influence of interaction of yarns. Wicking in the yarns is near to wicking in the capillaries (Wiener, 2002) and it is not the theme of this study.

3 WETTING OF INTER-YARN SPACES

At the wicking, the liquid is not only in the yarns, but also even in the inter-yarn spaces. Filling of these inter-yarn spaces by liquid is depended on the place of specific point above free liquid level. Radius of liquid curvature at the height H can be expressed for determined liquid by hydrostatic equation (1) and Laplace (2) equation as an equation (3) or (4).

$$P_H = -H \times \rho \times g \quad (1)$$

P_H —hydrostatic pressure (Pa)

H —height above the plane surface of water (m)

ρ —density of liquor ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

g —gravitation constant ($9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Pressure in the liquor depends on the curvature of liquid surface according Laplace equation:

$$P_L = \sigma_{LG} \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

P_L —Laplace pressure (Pa)

σ_{LG} —surface tension between liquor (L) and gas (G) ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

Wiener

R_1, R_2 —diameters of liquid surface curvatures(m)

For surface in shape "Gutter" we obtain from equations (1) and (2):

$$R = R_1 \quad R_2 = 0 \quad R = \frac{\sigma_{LC}}{H \cdot g \cdot \rho}$$

For surface in shape "Sphere" we obtain from equations (1) and (2):

$$R = R_1 = R_2 \quad R = \frac{\sigma_{LC}}{2H \cdot g \cdot \rho}$$

For hexadecane, water and silicone oil we obtain from (3) and (4).

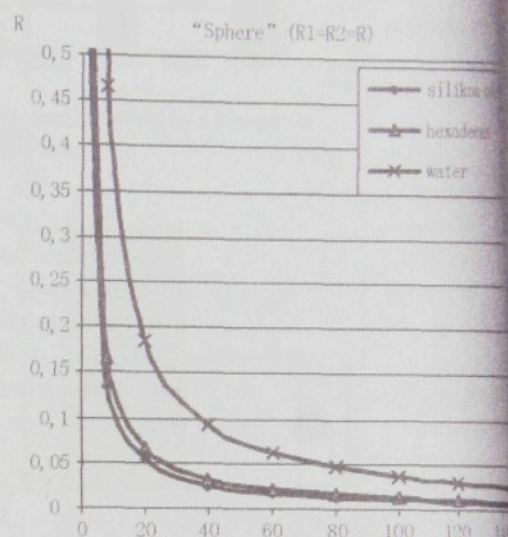
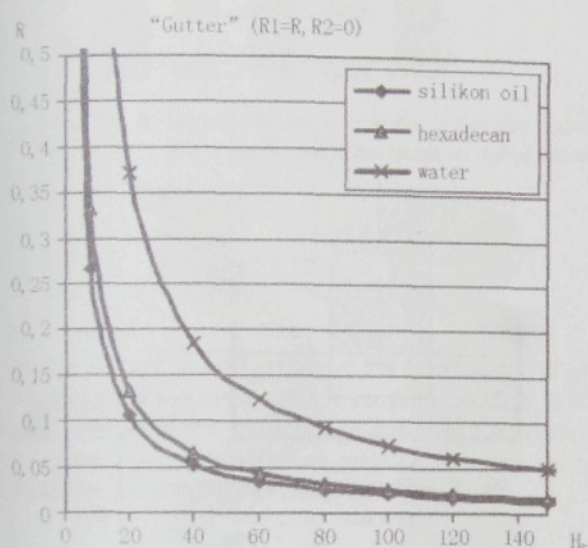


Fig. 2 Dependence of radius of liquid curvature R (mm) on the height H (mm) for hexadecane, silicone oil and water

The dimensions of inter- yarn spaces are approximately 0,2 mm (sett of the fabrics is usually approximately 2000 per meter and average diameter of yarn is 0,3 mm). For full filling of inter- yarn spaces by liquor, the liquid surface must have a radius of curvature bigger than approximately 0,2 mm. Radius of liquid curvature, which still achieves to fill cellules in fabric used by Pezron (1995), is same for hexadecane about 0,25 mm. In dependence on physical parameters of liquids, this value is obtained at height 5 ~20 mm above non- curved liquid level. It is in accordance with the geometrical idea.

Above this level, the radius of curvature of liquid surface farther rapidly falls and the liquid worse fills the inter- yarn spaces. So it can be reasonably expected at the fabric, that the amount of liquid among the fibers will be bigger in the lower part of wetted textile than in upper part of this textile. This effect will be less marked at thick fabrics with small inter- yarn cavities.

4 MODEL OF BONDING POINT FROM THE VIEWPOINT OF WETTING

Structure of the bonding point essentially influences the wicking of liquid into the fabric. Real bonding point is a geometrically complicated formation, which cannot be sufficiently accurately described for purposes of wicking. There is proposed the model working with marked simplification of the yarn shape but that includes the geometry of the bonding and shape of liquid in bonding point.

Here, the bonding point is the part of fabric which periodically repeats in the fabric as the smallest. At the Fig. 3 on the left is the scheme of the fabric in plain weave and at Fig. 3 on the right is bonding point marked, we will work with this in this study.

For purposes of the description of geometry of inter- yarn spaces it is necessary to simplify relatively difficult geometric system the circular cross-section of the thread we will regard the quadratic section. So the inter-yarn spaces become describable and mathematical calculable. Conversion of real situation to the simplified situation is at the following figure.

4.1 Pores Among the Yarns in the Bonding Point

4.1.1 Type "Wedge"

On the left; levels of liquid in the wedge-shaped pore for various levels

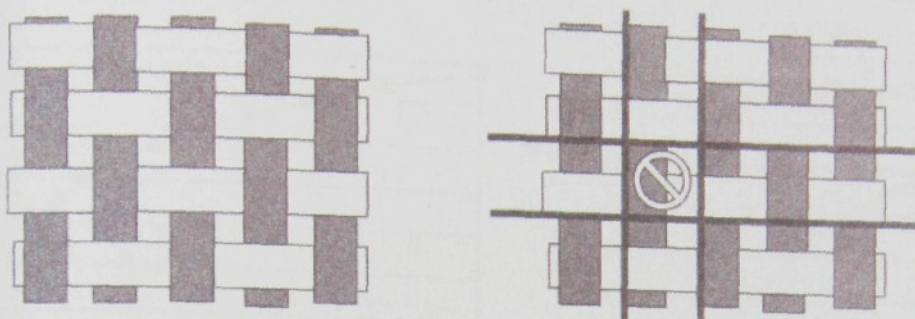


Fig. 3 Model of structure of fabric on the right figure the bonding point is marked so it is a part of textile whose periodical repetition makes possible to create whole fabric

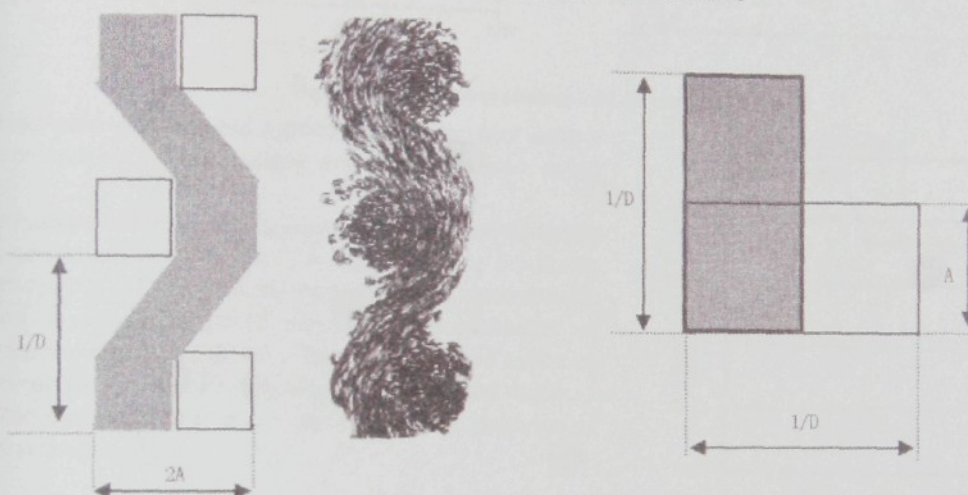


Fig. 4 On the left: Comparison of geometry of textile used model and real section by textile
On the right: bonding point with dimension lines

On the right: geometry of wedge-shaped pore

4.1.2 Type "Prism"

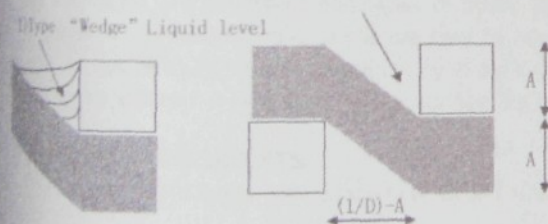


Fig. 5 Schema of pore "Wedge"

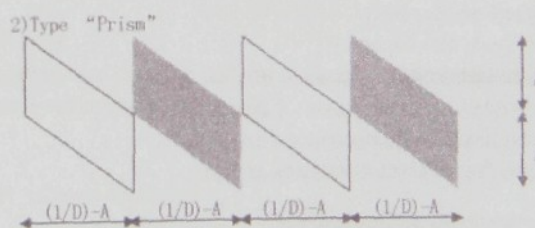


Fig. 6 Scheme of pore "Prism" pore walls after enfoldment

5 EXPERIMENTS

Material: Cotton fabric, surface density: $136 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, plain wave, thread diameter: 0,20 mm, thread density $D = 1900 \text{ m}^{-1}$

Liquid: Distilled water, (colored by $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

Experimental arrangement: see Fig. 1

Process: We measured suction height and weight of wicked water in range of 30 minutes.

6 RESULTS

Left: Time dependence of suction height and weight of wicked water in the cotton textile

Right: Dependence of "weight of wicked water" on suction height on cotton textile

Wiener

These experimental results are in general consistency with theory above. At the small suction height is the "weight of water in textile" height-slope of curve in the Fig. 7 is high. At the height "suction height" is the quantity of water in textile smaller-slope of curve in the Fig. 7 is small.

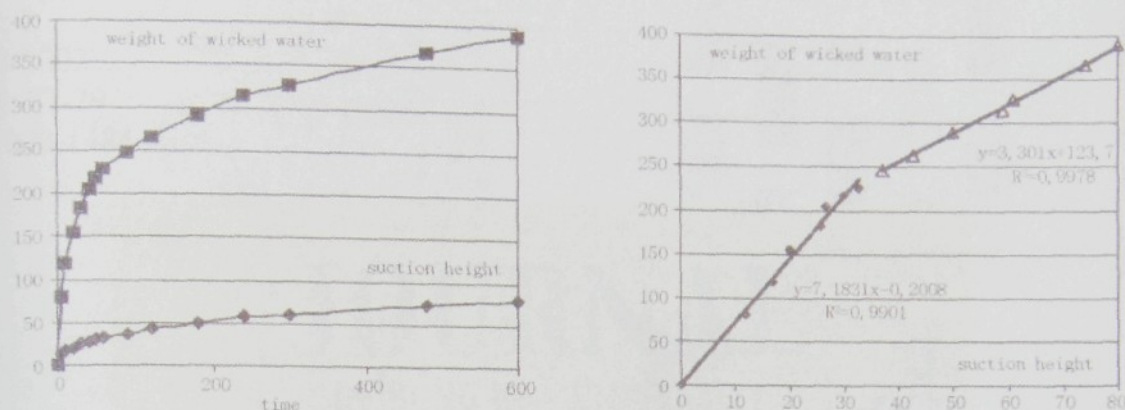


Fig. 7 Data of wicking process from different point of view

For tested fabric we calculated dependence of quantity of water in textile on radius of water surface and on the suction height (Fig. 8).

The calculation was executed for input parameters corresponding with experiments ($D = 1900 \text{ m}^{-1}$; $A = 0,0004 \text{ mm}$; $R = 0,005 \text{ mm}$; filling = 0,5). Experimentally the tested textile was saturated by water in maximal height 32 mm. From the calculation we obtain the maximal height 30 mm. The differences are based on the geometrical and physical simplifications in the used model. Presented model of fabric structures is useful for prediction of wicking properties.

6 CONCLUSION

In this work was proposed a new model of fabric, which is designed for wetting of textile structures in fabric. This model is based on simple geometrical ideas. Presented model of fabric structure can explain behavior of liquor by wicking into the fabric. In the fabric are described tree types of pores "wedge" and "prism". These types of pores are filled by liquor at different curvatures of liquid surface (respectively at the different height above the plain surface of liquor). Calculated volumes of liquor for different curvatures of liquid surface are in correlation with experimental data.

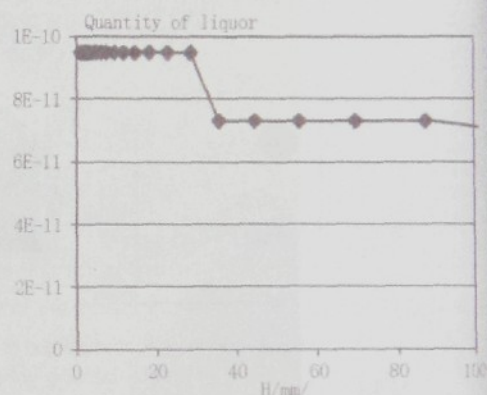


Fig. 8 Dependence of quantity of liquor (m^3 in one bonding point) in textile on the radius of curvature of liquid surface
 $D = 1900 \text{ m}^{-1}$; $A = 0,0004 \text{ mm}$; $R = 0,005 \text{ mm}$; filling = 0,5

ACKNOWLEDGMENTS

This study was created with support of: GACR 104/03/P031 (Czech republic)

REFERENCES

1. Wiener J., Binédová M., Zhu S., Capillary rise in fabrics. 5th International Conference Textile Science 2003, Liberec, Czech republic, ISBN 80-7083-711-X
2. Wiener J., Dejllov P., Equilibrium of wicking into a thread, 9. Conference Strutex, 2.- 3. th December 2002, Liberec, Czech republic
3. Wiener J., Dejllov P., Wicking in sloped thread, International Conference Strutex, December 2003, Czech republic
4. Pezron I., Bourgain G., Qu r D., Inhibition of a fabric. Journal of Colloid and Interface Science 173, 319 -327, 1995.

CORRESPONDENCE ADDRESS

Technical university of Liberec,
Hájkova 6,
Liberec 461 17, Czech Republic

[Příloha 12]

Autor: WIENER, J.

Název: **Dynamics of wicking**

Časopis: Journal of Dong Hua University

Ročník: 2

Číslo: 3/2002

Stránky: 77-79

ISSN 1000-1484



Dynamics of Wicking

Jakub Wiener*

Technical University of Liberec, Czech republic

An exponential model is proposed for the description of wicking, which is suitable for describing the whole process of wicking. Results are discussed and verified by the experimental data. Exponential model can be used to predict the wicking process in longitudinal and planar textiles.

Keywords: wicking process, capillary, wicking dynamics.

Many of important physical and chemical processes are based on the capillarity—spontaneous penetration of liquid into the porous systems. Capillary principles are used in various branches. Every day we come into contact with practical examples of wicking processes. Most of these processes are running in the pores among fibers in the textiles. In the last decades, considerable attention was paid to capillary phenomena. Dynamic of the capillary process was intensively studied especially due to its connection with comfort by the clothing using.

Technological problems have been intensively solved about capillary penetrating of colored liquid into a textile (and into other porous materials) at the ink printing.

Subject of this work is catching up the dynamics of wicking in textiles in time when the process is near to the equilibrium.

In this case, we don't use Lucas-Washburn equation, but this degree of wicking is very significant for comfort of the user.

Wicking dynamics depend on how quickly the liquid (the beads of perspiration) will be taken away from the surface of human body and how quickly it will be evaporated.

Introduction

The wicking process has been discussed in previous papers^[6-10]. It is difficult to draw a conclusion about the wicking process between the experiment and theoretical analysis. In this work, wicking process of pure liquid (without surfactants) is watched from infinite reservoir into the vertical textile, whose fibers and capillaries are oriented approximately vertically (it is valid for yarns or non-hairy planar textiles)—see Fig. 1. Suction height's measuring is the standard method for watching dynamics of wicking process^[1].

The basic relationship for describing the dynamics of wicking process is Lucas-Washburn^[3,4] equation (1) that was used for nearly one hundred years. This equation can be deduced from the equilibrium of interface and gravitation forces for liquid among fibers and it can be used for calculation of wicking dynamics at the

system of parallel capillaries.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{R \times \rho \times g \times (2 \times \sigma \times \cos(\Theta) - H \times R)}{8 \times \eta \times H} \quad (1)$$

η —Viscosity of liquid

σ —Surface tension

H —Suction height [m] at time t

R —Radius of capillary [m]

Θ —Contact angle of the liquid and fiber

ρ —Density of liquid

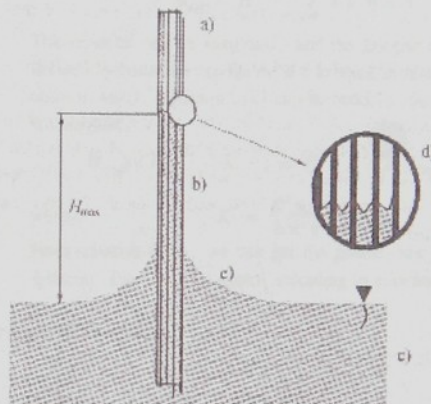


Fig.1 The equilibrium of the liquid wicking to the vertical fiber bundle^[2]

a) Fiber bundle—part without the liquid

b) Fiber bundle—part with the liquid (maximal height of the liquid rising is denoted as H_{max})

c) Liquid

d) Details of the liquid surface at height H_{max}

e) Transitional area between wetted fibers and ambient liquid

Equation (1) is based on the knowledge of the contact angle Θ of the liquid and fiber, the surface tension σ and the geometry of pores. This form of Lucas-Washburn relationship is not applicable to liquid wicking into real fibrous structure (e. g. into yarns, woven fabric). Here are the main reasons:

It is not correct to describe over-fibrous structure only by "radius of pores", which change with deformation of the structure (it may be caused by the surface tension of wicked liquid) and the variational value will be related to wetted area of textile (it depends on the characteristics of wicked liquid).

At the textile systems, equation (1) can only be used for

*Visit scholar of the Key Laboratory of Textile Science and Technology, Ministry of Education, China

Received May 29, 2002

calculating wicking dynamics of the non-twisted filament. This method is not acceptable for the branch of textile applications.

In this paper, the former knowledge of the maximum suction height (the equilibrium of wicking process) is a basis. This value can be experimentally determined or calculated for some basic textile structures. For example, for yarn (or filament) with large number of fibrils, this value^[5] can be calculated according to the equation (2):

$$H_{\max} = \frac{\sigma_{LG} \times 2 \times \cos(\Theta) \times \mu \times (1 + q)}{R_V \times g \times \rho \times (1 - \mu)} \quad (2)$$

$H_{\max}$ —equilibrium suction height (m)

μ —filling

q —shape factor of fiber

ρ —density of liquid ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

R_V —radius of fiber (m)

σ_{LG} —surface tension at the interface liquid-air ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

Θ —contact angle between liquid surface and surface of fiber ($^\circ$)

Dynamics of Wicking

Hagen-Poiseuille's equation describes the effect of pressure on the flow rate of Newtonian liquid in the tube. Liquid wicking rate dH/dt will be caused by constant pressure difference ΔP through a tube with the radius R and with a length l , and can be calculated as:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{R^2 \Delta P}{8 \eta l} \quad (3)$$

It is necessary to work with hydrostatic pressure for the description of pressure gradient:

$$P = -H \times \rho \times g \quad (4)$$

Considering the fact that the case of wetted surface is watched, the wicking occurs above plane liquid surface. Values H are larger than zero and the pressure acquires of negative values.

Because the spontaneous wicking will change values P and H , it is valid:

Pressure difference is given by difference between hydrostatic pressures P_1 and P_2 .

$$\Delta P = (P_2 - P_1)$$

where

P_1 is a value of pressure, that will reach up at the highest (equilibrium) suction high $H_{\max}$.

$$P_1 = -H_{\max} \times \rho \times g \quad (5)$$

P_2 is topical hydrostatic pressure at the height (H) of wicked liquid at the time t .

$$P_2 = -H \times \rho \times g \quad (6)$$

The pressure difference can be calculated from the difference of pressure P_1 and P_2 .

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho \times g \times (H_{\max} - H) \quad (7)$$

"Length of tube" is directly proportional to the suction height H . In the ideal case of the direct capillary, the length of tube is the same as suction height. In the case of the curved capillaries (e. g. in yarn), this model is not acceptable; therefore it is necessary to work with a corrective parameter k :

$$l = H \times k \quad (8)$$

After equation (7), (8) is substituted into the Hagen-Poiseuille's equation, the result is:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{R^2 \times \rho \times g \times (H_{\max} - H)}{8 \times \eta \times k \times H} \quad (9)$$

This equation is a parallel (or a generalization) of well-known Lucas-Washburn relationship—equation (1). Equation (10) can be deduced after equation (9) is integrated.

$$\int_0^{H(t)} \frac{H}{H_{\max} - H} dH = \int_0^t \frac{R^2 \times \rho \times g}{8 \times \eta \times k} dt \quad (10)$$

This equation can be integrated, and the integral constant can be decided by boundary condition (if t is equal to zero, the H is also equal to zero). Equation (11) can be deduced after equation (10) is integrated.

$$H_{\max} \ln(H_{\max}) - K_1 \cdot t = H + H \cdot \ln(H_{\max} - H) \quad (11)$$

where:

$$K_1 = \frac{R^2 \times \rho \times g}{8 \times \eta \times k}$$

From equation (11), we can get the general law of the wicking dynamic. Fig. 2 can be gotten according to equation (11).

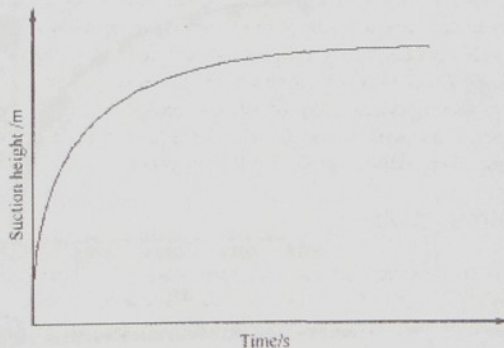


Fig.2 The general relation between suction height and time

From Fig.2, the curve is similar to some exponential curve, so we call this model an exponential model. In this model, we can draw the conclusion that the surface of wicking liquid will be near to the equilibrium infinitely

Experimental

Experimental arrangement was in conformity with Fig. 1. Experimental realization was as follows: In the glass cylinder with relative air humidity near 100% (so there is no evaporation from liquid surface), fiber bundle (respectively other textile) was located with weight (constant tension $0.2 \text{ N} \cdot \text{tex}^{-1}$). The lower

end of textile was immersed into a colored liquid for 2 hours. The height of wicking liquid in the fiber bundle was measured visually with special preparation. Error of measurement was ± 0.5 mm.

Results

Exponential model is in good agreement with the experimental data of liquid wicking into the longitudinal textiles. See Fig. 3:

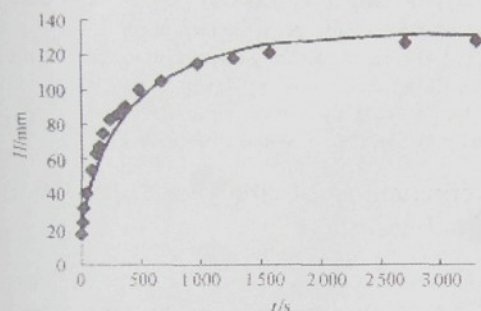


Fig. 3 Suction height in the vertical bundle of polyamide fibers

Notes: experimental data are inserted by exponential model ($H_{\max} = 145$ mm)

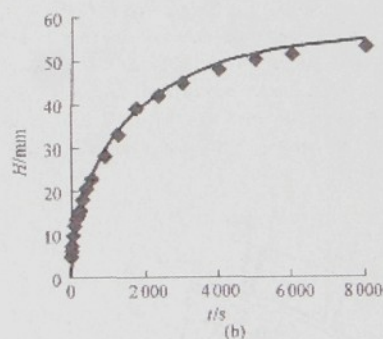
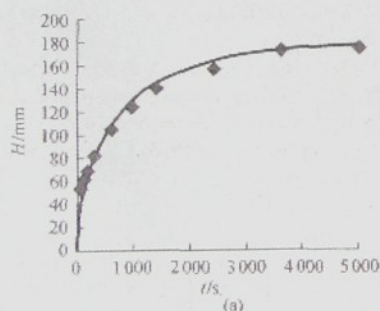


Fig. 4 Suction height on time in the cotton fabric ((a), $H_{\max} = 179$ mm) and in the non-woven fabric ((b), $H_{\max} = 56$ mm)

Notes: experimental data are approximated by exponential model

References

- [1] Labajos-Broncano, L.-Gonzalez-Martín, M.L.-Brique, J. M.-Gonzalez-García, C. M., *J. of Coll. and Interf. Sci.*, 2001, 233, 356–360
- [2] Wiener, J., *Wicking*, conference Strutex 2000, Liberec, December 2000
- [3] Washburn, E. W., *Phys. Rev.*, 1923, 27, 273
- [4] Lucas, R., *Kolloid Z.*, 1918, 23, 15
- [5] Wiener, J., *Wicking in yarns*, conference Strutex 2001, Liberec, December 2001
- [6] Zhmud, B. V., Tiber, F., Hallstenson, K., *J. of Colloid and Interface Sci.*, 2000, 228, 263–269
- [7] Kamath, Y. K., Hornby, S. B., Weigmann, H. D., Wilde, M. F., *Textile res. J.*, 1994, 64(1), 33–40
- [8] Delker, T.-Pengra, D.-Wong, P., *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(16), 2902
- [9] Noble, J.-Arnold, A., *Chem. Eng. Commun.*, 1991, 100, 95
- [10] Philip, P. R., *Soil Sci.*, 1957, 84, 257



U 583 T