

mgr inż. Jakub JAKUBIEC
dr hab. inż. Andrzej MIZERSKI, prof. SGSP
Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Zakład Środków Gaśniczych

BADANIE KINETYKI NASYCANIA KAPILARNEGO TKANIN BAWĘLNIANYCH ROZTWORAMI SURFAKTANTÓW

Przedstawiono wyniki badań kinetyki nasycania kapilarnego tkanin bawełnianych roztworami koncentratów surfaktantów. Wykonano cztery modelowe koncentraty o składzie zbliżonym do składu pianotwórczych środków gaśniczych pod względem rodzaju składników i ich zawartości w koncentracie. Każdy z koncentratów zawierał tylko jeden surfaktant, rozpuszczalnik organiczny, stabilizator piany i wodę. Badano surfaktanty o różnym charakterze: anionowym, kationowym, amfoterycznym i niejonowym. Tkaniny nasycano roztworami koncentratów o stężeniach 0,5 i 1,0% obj. Omówiono różnice zdolności zwilżających badanych surfaktantów w stosunku do tkanin bawełnianych i porównano uzyskane wyniki z danymi literaturowymi i teoretycznymi krzywymi kinetyki nasycania roztworami surfaktantów.

1. WSTĘP

Znaczący udział wśród materiałów spalających się w pożarach zaliczanych do grupy A stanowią materiały tekstylne. Są to np. firany, dywany, obicia mebli, odzież w domach i sklepach; wykładziny w biurach; fotele, kotary i dekoracje w kinach i teatrach, tkaniny, dzianiny w zakładach przemysłu włókienniczego oraz magazynach gotowych produktów itd. Porowata struktura tych materiałów powoduje specyficzne problemy podczas gaszenia, zależne

od charakteru powierzchni. Jeżeli jest ona hydrofobowa skuteczność gaszenia wodą będzie niewielka. Woda z trudnością przenika w głąb struktury tych materiałów, a jej większość spływa po powierzchni nie przynosząc oczekiwanych skutków. Zwykle w takich przypadkach rutynowym postępowaniem jest użycie dodatków poprawiających zdolności zwilżające wody. Są nimi przede wszystkim pianotwórcze środki gaśnicze typu S, które dodawane są w stężeniach $0,5 \div 1,0\%$. Specjalne zwilżacze pożarnicze są bardzo rzadko stosowane. Wyparły je środki pianotwórcze klasy A.

Dotarcie wody i roztworów surfaktantów w głąb warstw hydrofobowych, zależnie od wielkości ich porów, może być skrajnie trudne lub niemożliwe, czego dobrym przykładem jest gaszenie pożarów torfowisk i węgla w kopalniach lub w hałdach. Podobnych problemów można się spodziewać przy gaszeniu magazynów materiałów włókienniczych, przy wysokich warstwach składowanych materiałów. Zrozumienie zjawisk towarzyszących nasycaniu kapilarnemu roztworami surfaktantów sprzyja podejmowaniu racjonalnych decyzji podczas gaszenia tego rodzaju pożarów.

2. KINETYKA NASYCANIA KAPILARNEGO

2.1. Nasycanie cieczami jednorodnymi

Struktura ciał porowatych jest bardzo złożona. Do opisu procesów nasycania cieczami takich materiałów wykorzystywane są ich uproszczone modele. Najprostszym z nich jest model, w którym przestrzeń porowata traktowana jest jak zespół przelotowych kapilar o jednakowej średnicy. Taki model ciał porowatych można stosować do opisu procesu nasycania materiałów takich jak włókna, papier, drewno, itp.

Przepływ cieczy w kapilarach można opisać równaniem Poiseuille'a [1, 2, 3]:

$$V = \pi \cdot \frac{\Delta p \cdot r^4 \cdot \tau}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (1)$$

gdzie:

V – objętość cieczy, która przepłynęła przez kapilarę w czasie τ ,

η – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy,

r – promień kapilary,

l – długość kapilary,

Δp – różnica ciśnień po obu stronach kapilary.

Średnią liniową prędkość przepływu cieczy w kapilarze można wyznaczyć ze wzoru:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{r^2 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (2)$$

W trakcie wciągania cieczy do kapilary (przeciwko sile grawitacji) różnica ciśnień Δp określana jest przez różnicę ciśnienia kapilarnego oraz hydrostatycznego:

$$\Delta p = p_k - \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

gdzie: p_k – ciśnienie kapilarne określone wzorem:

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r}$$

σ – napięcie powierzchniowe,

θ – kąt zwilżania,

ρ – gęstość cieczy,

g – przyspieszenie ziemskie,

l – długość odcinka kapilary nasyconego cieczą,

α – kąt pochylenia kapilary względem poziomu.

Z przedstawionych wzorów wynika, że nasycanie pod działaniem wyłącznie sił kapilarnych jest możliwe, gdy $\cos\theta > 0$, tzn. $\theta < 90^\circ$, a graniczną wysokość l_∞ na jaką ciecz może zostać podniesiona można wyznaczyć z bilansu równowagi ciśnienia kapilarnego i hydrostatycznego:

$$l_\infty = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r \cdot \rho \cdot g \cdot \sin\alpha} \quad (4)$$

Po uwzględnieniu równań (3), równanie (2) przyjmie postać:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{r^2}{8 \cdot \eta \cdot l} (p_k - \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin\alpha) \quad (5)$$

W przypadku wąskich kapilar w początkowym etapie nasycania ciśnienie kapilarne jest dużo wyższe od hydrostatycznego ($p_k \gg \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin\alpha$). Po zaniedbaniu w równaniu 5 ciśnienia hydrostatycznego rozwiązanie przyjmie postać:

$$l^2 = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \tau}{2\eta} \quad (6)$$

Zależność (6) nazywana jest równaniem Washburne'a.

Podczas przepływu przez kapilarę cieczy jednorodnej, wartości σ , θ i η są stałe, więc równanie (6) można zapisać w postaci:

$$l = k \cdot \sqrt{\tau} \quad (7)$$

Zależność wysokości nasycenia (lub masy wchłoniętej cieczy) od pierwiastka kwadratowego z czasu jest, w przypadku cieczy jednorodnej, linią prostą [2, 3, 4, 5].

2.2. Nasycanie wodnymi roztworami surfaktantów

Dodanie do wody surfaktantów powoduje obniżenie napięcia powierzchniowego, a także zmianę kąta zwilżania ciała stałego. Obniżenie napięcia powierzchniowego spowodowane jest powstawaniem warstwy adsorpcyjnej surfaktantu na granicy roztwór-powietrze. Dzięki tej warstwie możliwe jest obniżenie kąta zwilżania materiałów hydrofobowych do wartości niższych od 90° , co jest warunkiem nasycania kapilarnego bez udziału sił zewnętrznych. Jednak w przypadku roztworów surfaktantów nasycanie nie przebiega według zależności (7), gdyż wartości σ i $\cos\theta$ zmieniają się w trakcie nasycania. Na skutek adsorpcji surfaktantu na materiale stałym zmienia się jego stężenie w strefie przesuwanego się menisku, a w konsekwencji także wartości napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania. Równanie (7) przybiera w takim przypadku postać:

$$l = K \cdot \sqrt{\sigma \cdot \cos\theta} \cdot \tau \quad (8)$$

Iloczyn $\sigma \cdot \cos\theta$ nazywany jest *napięciem zwilżania*.

Przy spadku stężenia surfaktantu w strefie menisku zgodnie z izotermą adsorpcji Gibbsa, napięcie powierzchniowe nie zmienia się aż do osiągnięcia wartości *krytycznego stężenia micelarnego* (cmc). Nie zmienia się także charakter powierzchni cieczy, gdyż w obszarze stężeń powyżej cmc istnieje na niej monomolekularna warstwa adsorpcyjna surfaktantu. W związku z tym w przybliżeniu stała powinna być też wartość kąta zwilżania. Początkowy etap nasycania przebiega według zależności (7).

Gdy na skutek adsorpcji na powierzchni materiału stałego stężenie surfaktantu w strefie menisku obniży się poniżej cmc, skokowo zmniejsza się szybkość nasycania. W warstwie powierzchniowej wytwarza się nowy stan równowagi, któremu odpowiada inna, niższa wartość napięcia zwilżania. Ten stan zależny jest od rodzaju nasycanego złoża (charakter powierzchni i średnica porów) oraz od rodzaju surfaktantu (łatwość adsorpcji, szybkość dyfuzji w roztworach, szybkość dyfuzji powierzchniowej). Nasycanie w obszarze stężeń surfaktantów poniżej cmc przebiega więc także w myśl równania (7), ale przy innej wartości stałej k , związanej z nową wartością napięcia zwilżania. Krzywa nasycania warstw materiałów porowatych roztworami surfaktantów składa się z dwóch w przybliżeniu prostoliniowych odcinków [6, 7, 8, 9].

W granicznym przypadku, gdy przy określonym stężeniu powierzchniowym surfaktantu, kąt zwilżania osiągnie wartość 90° , nasycanie zostaje zatrzymane ($\cos\theta = 0$), a dalszy jego przebieg zależy od możliwości powierzchniowej dyfuzji surfaktantów. Z taką sytuacją można mieć do czynienia w przypadku nasycania roztworami surfaktantów drobnoporowatych, jednorodnych złóż suchego torfu lub węgla brunatnego [10, 11, 12, 13].

Wpływ surfaktantu na nasycanie kapilar zależy nie tylko od jego adsorpcji na granicy ciecz–gaz, ale również od adsorpcji na powierzchni ciała stałego. Przy założeniu, że surfaktant adsorbuje się na powierzchni kapilary tworząc warstwę monomolekularną, w której jedna cząsteczka zajmuje powierzchnię A , to proste obliczenie prowadzi do wyrażenia na obniżenie stężenia roztworu Δc w kapilarze o promieniu r :

$$\Delta c = \frac{2}{A \cdot N_A \cdot r \cdot 10^3} \text{ [mol/dm}^3\text{]} \quad (9)$$

gdzie: N_A – liczba Avogadro.

Cząsteczka surfaktantu, w którym grupa hydrofobowa jest liniowym łańcuchem alkilowym, zajmuje w nasyconej warstwie adsorpcyjnej na powierzchni hydrofobowej, powierzchnię około $0,3 \text{ nm}^2$. W kapilarach o promieniu $1 \mu\text{m}$ ubytek stężenia roztworu spowodowany adsorpcją może wynieść 11 mmol/dm^3 . Odpowiada to zmniejszeniu stężenia roztworu środka pianotwórczego typu S o 2%. Jest to najwyższe zalecane stężenie roztworu przy użyciu środka pianotwórczego w charakterze zwilżacza [10].

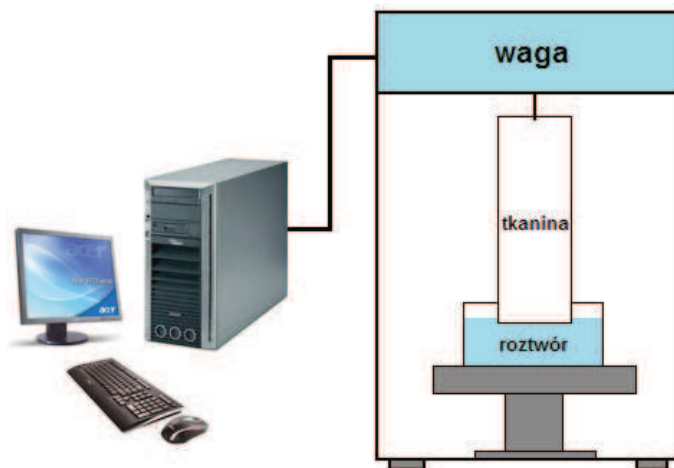
2.3. Badanie zwilżalności tkanin bawełnianych

Do modelu warstwy, będącego pękiem pionowych kapilar, zbliżone są włókna tkanin. Natomiast sama tkanina, będąca spletem włókien, jest typowym materiałem porowatym składającym się z labiryntu kapilar przebiegających w różnych kierunkach oraz sieci przestrzeni o większych rozmiarach, którą tworzą oczka tkaniny. Może być więc wygodnym materiałem w stosowaniu do porównawczych badań kinetyki nasycania warstw roztworami surfaktantów.

2.4. Opis stanowiska pomiarowego i przebieg pojedynczego pomiaru

Schemat stanowiska do badania kinetyki nasycania tkanin przedstawiono na rys. 1. Do naczynia o pojemności 60 cm^3 nalewano badaną ciecz (etanol, wodę lub roztwór surfaktantu). Pod szalką wagi (firmy RADWAG, model PS

600/C/2) zawieszano pasek tkaniny. Waga połączona była z komputerem, na którym rejestrowane były jej wskazania w odstępach 10 s, przy użyciu programu Pomiar-Win v.3.1.3. Po odaretowaniu wagi pasek zanurzał się w cieczy na głębokość około 2 mm. W tym momencie rozpoczynało się pomiar, który trwał do ustalenia wskazań wagi lub przez okres 15 minut. Otrzymane wyniki zapisywane były i przetwarzane w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do badania kinetyki nasycania kapilarnego tkanin

2.5. Charakterystyka badanych tkanin i surfaktantów

W badaniach wykorzystano bawełnianą tkaninę techniczną. Bawełna techniczna nasycana jest w procesie technologicznym tłuszczami lub smarami, co nadaje jej charakter hydrofobowy. Chcąc porównać kinetykę nasycania tkaniny hydrofobowej i hydrofilowej o takiej samej strukturze, część tkaniny wyprano, wypłukano w wodzie i w etanolu, a następnie wysuszono. Dzięki temu uzyskano tkaninę hydrofilową, której pozostałe właściwości oraz struktura nie uległy zmianie w stosunku do tkaniny pierwotnej.

Za pomocą mikroskopu Delta Optical – UM 012 z wbudowaną kamerą, dokonano oceny splotu tkaniny, grubości włókien oraz wielkości oczek splotu. Uzyskano następującą charakterystykę tkaniny:

- grubość pojedynczego włókna – 0,75 mm,
- splot tkaniny nierównomierny – oczka splotu miały kształt rombu lub kwadratu o wielkości boku do 0,5 mm,
- masa powierzchniowa tkaniny (wyznaczona doświadczalnie) wynosiła 0,417 kg/m².

Dla potrzeb badań wykonano cztery modelowe koncentraty surfaktantów o różnym charakterze. Koncentraty miały następujący skład: 20% wag. surfaktantu, 25% rozpuszczalnika organicznego i 55% wody destylowanej. Podobne proporcje tych składników są stosowane w pianotwórczych środkach gaśniczych. Sporządzone koncentraty modelowe różniły się od środków pianotwórczych brakiem stabilizatora piany i substancji hydrotropowych. Zastosowano następujące surfaktanty:

- W koncentracie **K-1** – dodecylsulfian sodu (SDS) – surfaktant anionowy, ultraczysty (> 98%) firmy CARL ROTH GmbH & Co.
- W koncentracie **K-2** – bromek cetylotrimetyloamoniowy (CTAB) – surfaktant kationowy o czystości > 99%, firmy ACROS ORGANICS.
- W koncentracie **K-3** – Triton X 100 (T-X100) – niejonowy surfaktant (eter dekaetoksy-4-t-oktylofenyloowy), czysty, firmy CARL ROTH GmbH & Co.
- W koncentracie **K-4** – Betaina CAB (CAB). Jest to handlowy, wodny koncentrat zawierający około 30% kokoamidopropylobetainy – mieszaniny surfaktantów amfoterycznych na bazie oleju kokosowego, w której największy udział (44%) ma pochodna laurynowa.

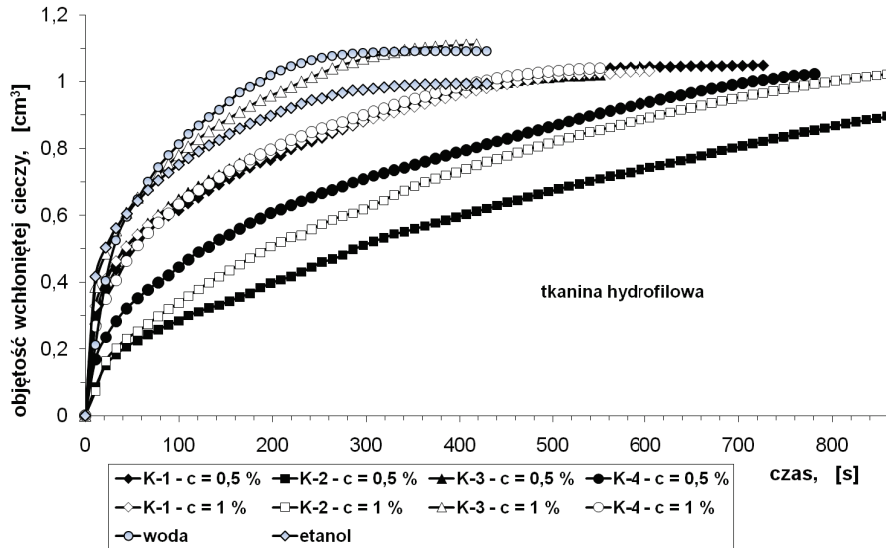
2.6. Wyniki pomiarów

Badania kinetyki nasycania tkanin przeprowadzono dla roztworów modelowych koncentratów o stężeniach 0,5 i 1,0% wag. Roztwory sporządzano w wodzie destylowanej o temperaturze $22 \pm 1^\circ\text{C}$.

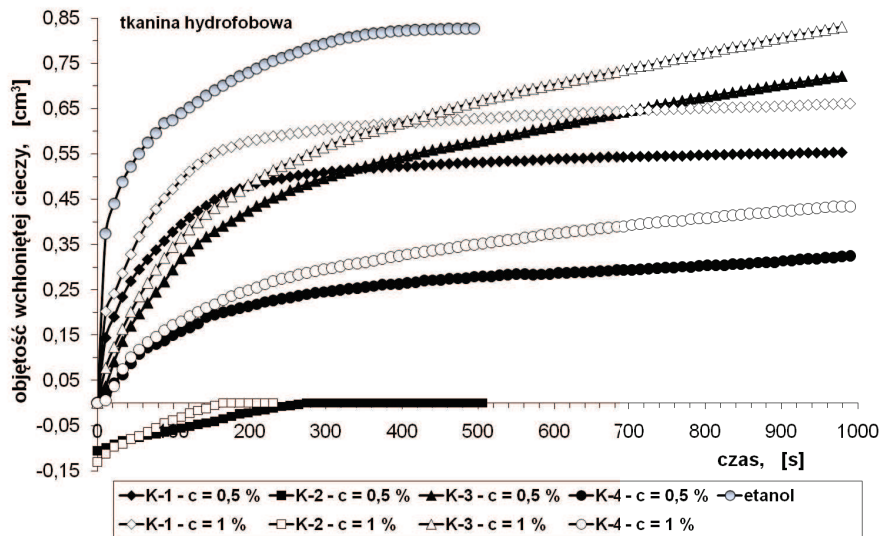
Dla porównania zbadano kinetykę nasycania tkanin etanolem, który jest często stosowany jako ciecz wzorcowa o doskonałych właściwościach zwilżających, a także w przypadku bawełny hydrofilowej wodą destylowaną. Bawełna hydrofobowa nie ulegała nasycaniu wodą. W czasie pomiarów w pomieszczeniu panowała temperatura $22 \pm 2^\circ\text{C}$.

Pomiary nasycania tkanin dokonywano bez powtórzeń. W celu oszacowania niepewności wyników przeprowadzono serię 10 pomiarów nasycania tkaniny hydrofobowej 1-procentowym roztworem koncentratu K-1. Obliczone odchylenie standardowe pomiaru masy końcowej (po 900 s) wyniosło 0,042 g, przy średniej masie końcowej równej 0,689 g.

Wynikiem każdego pomiaru była zależność masy cieczy wchłoniętej przez materiał od czasu. Ze względu na to, że dla porównania badano także kinetykę nasycania etanolem – cieczą o znacznie niższej gęstości niż woda i roztwory wodne, masę cieczy przeliczano na objętość. W takiej postaci krzywe nasycania tkanin roztworami modelowych koncentratów przedstawiono na rys. 2 i 3.

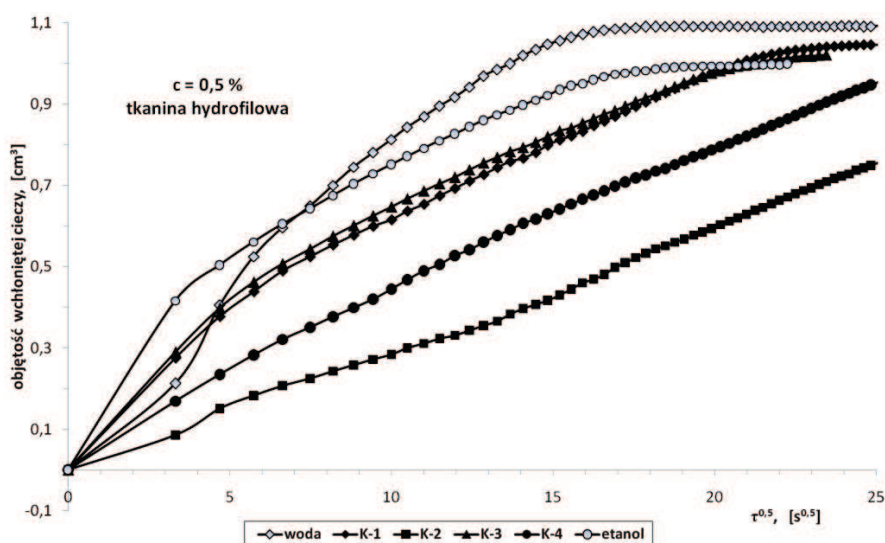


Rys. 2. Krzywe nasycania bawełny hydrofilowej roztworami modelowych koncentratów, wodą i etanolem



Rys. 3. Krzywe nasycania bawełny hydrofobowej roztworami modelowych koncentratów i etanolem

Nasycanie tkaniny hydrofilowej przebiega zgodnie z zależnością (7). Wykresy zależności $V = f(\tau^{0,5})$ są w przybliżeniu liniami prostymi za wyjątkiem obszaru początkowego, w którym zwilżana jest część mająca kontakt z cieczą (rys. 4). Jest to trwający 20-30 s okres, w którym nie ustaliła się jeszcze równowaga nasycania kapilarnego.



Rys. 4. Wykresy zależności $V = f(\tau^{0,5})$ nasycania tkaniny hydrofilowej wodą, etanolem i roztworami surfaktantów

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów kinetyki nasycania – maksymalną objętość wchłoniętej cieczy (w czasie 900 s) oraz szybkość wchłaniania kapilarnego odpowiadającą prostoliniowemu odcinkowi wykresu.

Tabela 1. Wyniki pomiarów nasycania tkaniny hydrofilowej cieczami jednoskładnikowymi i 0,5-procentowymi roztworami modelowych koncentratów

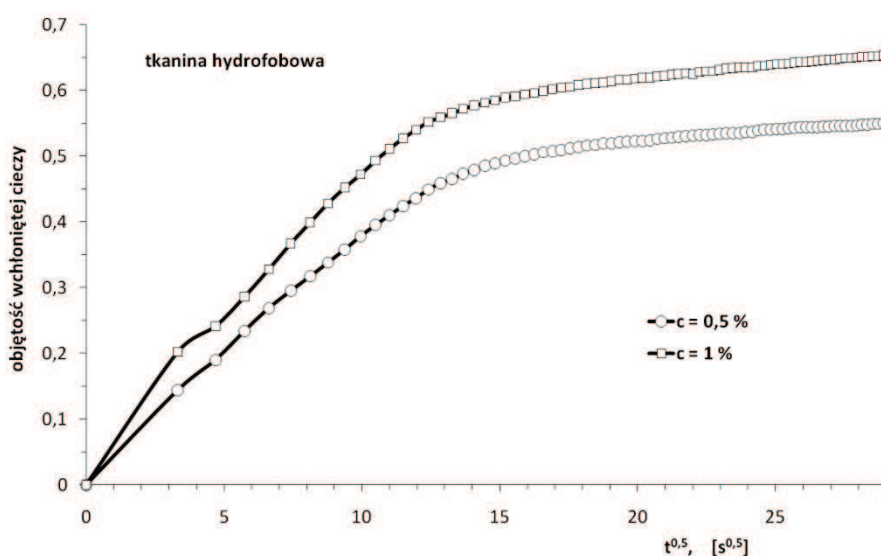
Koncentrat	Szybkość nasycania, [cm ³ /s]		Całkowita objętość, [cm ³]	
	c = 0,5%	c = 1%	c = 0,5%	c = 1%
K-1	1,4	1,2	1049	1031
K-2	1,0	1,1	897	1022
K-3	1,3	2,2	1021	1112
K-4	1,0	1,2	1023	1040
woda	3,2		1093	
etanol	1,7		999	

Bawełna hydrofilowa jest najszybciej nasycana wodą. Etanol wchłaniany jest wolniej, mniejsza jest też jego maksymalna objętość w warunkach ustalenia się równowagi. Jest to m.in. związane z niższym ciśnieniem kapilarnym, wynikającym z niskiego napięcia powierzchniowego etanolu. Wskutek tego część przestrzeni porowatej o większych rozmiarach nie może być zajęta przez etanol.

Wyraźnie gorsze zdolności zwilżające niż woda wykazują roztwory surfaktantów, z wyjątkiem 1-procentowego roztworu koncentratu K-3 (surfak-

tant niejonowy). Uzyskano tu podobne zależności jak w badaniach innych porowatych materiałów hydrofilowych [11].

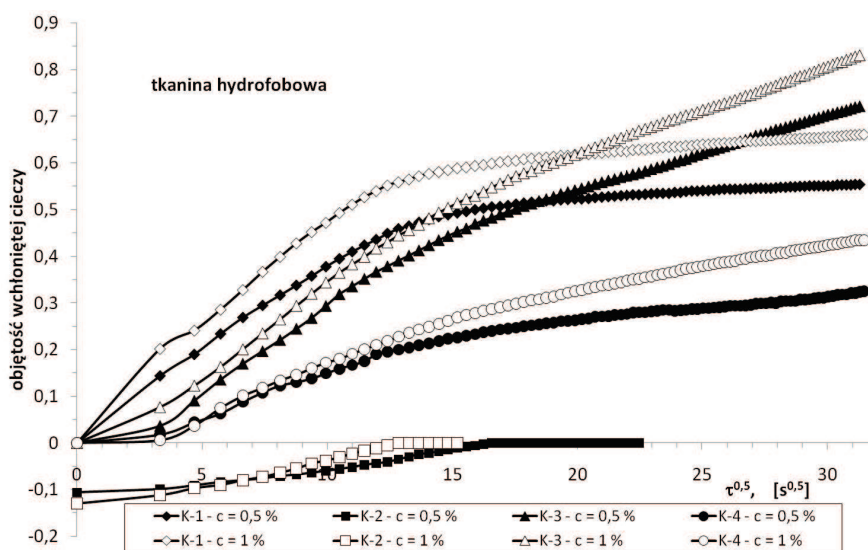
Przebieg nasycania tkaniny hydrofobowej był zgodny z zależnością (8) i z danymi literaturowymi [3, 4, 6, 8, 11]. Na krzywej nasycania występują dwa prostoliniowe odcinki różniące się kątem nachylenia do osi czasu. Na rys. 5 przedstawiono przebieg nasycania tkaniny hydrofobowej roztworami koncentratu K-1 (SDS), jako zależność objętości wchłoniętej cieczy od pierwiastka kwadratowego z czasu nasycania.



Rys. 5. Przebieg nasycania tkaniny hydrofobowej roztworami koncentratu K-1

Z punktu widzenia zastosowań gaśniczych, szybkość nasycania w pierwszym etapie może charakteryzować zdolności zwilżające roztworu przy gaszeniu pożarów powierzchniowych. Szybkość nasycania w drugim etapie mówi o możliwości dotarcia roztworu do wnętrza warstw. Różnice między surfaktantami o różnym charakterze widać na rys. 6. W tabeli 2 zestawiono szybkości nasycania tkanin roztworami badanych koncentratów w obu etapach.

Najgorsze zdolności zwilżające miały roztwory koncentratu K-2 (surfaktant kationowy). Oba roztwory wnikały tylko w materiał mający kontakt z roztworem, ale nie były podciągane ponad poziom cieczy siłami kapilarnymi. Ma to związek z silną adsorpcją surfaktantów kationowych na powierzchniach o ujemnym ładunku, a taką jest bawełna. W pracy [14] stwierdzono, że adsorpcja CTAB (w prezentowanej pracy koncentrat K-2) na powierzchni celulozy jest 5-krotnie wyższa niż adsorpcja Tritonu TX-100 (koncentrat K-3).



Rys. 6. Kinetyka nasycania bawełny hydrofobowej

Tabela 2. Wyniki pomiarów kinetyki nasycania tkaniny hydrofobowej

Koncentrat	Szybkość nasycania, [mg/s]				Masa końcowa (po 15 min.) [mg]	
	I etap		II etap		c = 0,5%	c = 1%
	c = 0,5%	c = 1%	c = 0,5%	c = 1%		
K-1	2,03	3,00	0,08	0,14	551	656
K-2	0,40	0,75	0	0	0	0
K-3	2,10	2,33	0,37	0,52	704	807
K-4	0,93	0,90	0,13	0,30	314	424

Na rys. 6 widać, że krzywe nasycania bawełny hydrofobowej roztworami surfaktantów mają typowy, dwuetapowy przebieg, którego mechanizm opisano powyżej. Najwyższe zdolności nasycania mają roztwory niejonowego koncentratu K-3. W pierwszym etapie szybkości nasycania roztworów K-3 i anionowego K-1, i są podobne. W drugim etapie szybkości nasycania roztworami K-3 były 4-krotnie większe niż roztworami K-1. Podobne zależności opisano w pracy Simončič B., Rozman V. [15]. Szybkości nasycania roztworami amfolytycznego koncentratu K-4 o stężeniach 0,5% i 1% były w I etapie prawie identyczne i były odpowiednio 2- i 3-krotnie niższe od szybkości nasycania roztworami K-1 i K-3 (tabela 2). W II etapie szybkości nasycania roztworami K-4 były już około 2-krotnie większe niż roztworami K-1.

Gdyby za miarę zdolności zwilżającej przyjąć objętość wchłoniętego roztworu w czasie pomiaru, to najlepsze właściwości zwilżające miałyby koncentrat K-3 przed K-1 i K-4. Jednak z przebiegu krzywych widać (rys. 6), że wobec znacznego spowolnienia nasycania roztworami koncentratu K-1 w dru-

gim etapie, po dłuższym czasie wyższy poziom nasycenia uzyskanoby przy użyciu roztworów koncentratu K-4.

Dane zawarte w tabeli 2 pokazują, że trudno jest jednoznacznie wskazać kryteria oceny zdolności zwilżających. Z punktu widzenia możliwości osiągnięcia szybkiego efektu gaśniczego w początkowym okresie, ważna jest szybkość nasycania w I etapie. Pod tym względem badane koncentraty można następująco uszeregować, zaczynając od najlepszych zdolności zwilżających: $K-1 > K-3 > K-4$. Jeżeli za kryterium zdolności zwilżających przyjąć maksymalną masę roztworu wchłoniętego przez tkaninę, to kolejność właściwości zwilżających koncentratów będzie następująca: $K-3 > K-1 > K-4$. Pod względem szybkości nasycania tkaniny w powolnym etapie, w którym decydującą rolę odgrywa szybkość dyfuzji surfaktantów do strefy menisku, najlepsze zdolności zwilżające ma niejonowy koncentrat K-3, a następnie K-4. Najsłabsze zdolności zwilżające w tym etapie wykazuje anionowy koncentrat K-1, o składzie zbliżonym do składu pianotwórczych środków gaśniczych typu S.

3. WNIOSKI

- Nasycanie tkanin bawełnianych zachodzi w dużym przybliżeniu zgodnie z teoretycznym opisem nasycania kapilar.
- Roztwory surfaktantów wolniej nasycają bawełnianą tkaninę hydrofilową niż woda.
- Najsłabsze zdolności zwilżające w stosunku do tkanin bawełnianych wykazują roztwory surfaktantu kationowego (CTAB). W przypadku tkaniny hydrofobowej nie zachodzi nasycanie kapilarne.
- Przy nasycaniu tkanin hydrofobowych lepsze zdolności zwilżające wykazują roztwory niejonowego surfaktantu Triton X-100 niż anionowego dodecylosiarczanu sodu, będącego najczęściej spotykanym składnikiem środków pianotwórczych typu S.
- Szybkość nasycania tkaniny w I etapie może charakteryzować zdolności zwilżające roztworów przy gaszeniu pożarów powierzchniowych, natomiast szybkość nasycania w II etapie – przy gaszeniu pożarów podpowierzchniowych.

PIŚMIENICTWO

- [1] Aksielrud G.A., Altszuler M.A.: Ruch masy w ciałach porowatych, WNT, Warszawa 1987.
- [2] Ayala R.E., Casassa E.Z., Parfitt G.D.: A study of the applicability of the capillary rise of aqueous solutions in the measurement of contact angles in powder systems, *Powder Technology*, 1987, 51(1), 3–14.
- [3] Hodgson K.T., Berg J.C.: The effect of surfactants on wicking flow in fiber networks, *Journal of Colloid & Interface Science*, Vol. 121, Jan 1988, s. 22–31.
- [4] Berezkin V.V., Ershov A.P., Esipova N.E., Zorin Z.M., Churaev N.V.: Study of wetting of hydrophobic capillaries with surfactant solutions under external pressure, *Colloid Journal*, 1979, 41(5), s. 849–855.
- [5] Zolotarev P.P., Starov W.M., Churaev N.W.: Kinetics of imbibition of surfactant solutions into capillaries, *Colloid J.*, 1976, 38(5), 895–901.
- [6] Berezkin V.V., Zorin Z.M., Frolova Z.M., Churaev N.V.: Kinetics of imbibing of surfactant solutions into capillaries, *Colloid Journal*, 1975, 37(6), 1040–1044.
- [7] Ershov A.P., Zorin Z.M., Svitova T.F., Churaev N.V.: Characteristics of imbibition of nonionic surfactant solutions into hydrophilic capillaries. Water-oil systems, *Colloid Journal*, 1993, 55(4), s. 45–53.
- [8] Popescu G., Nechifor Gh., Olteanu M.: The influence of surfactants on the wetting of hydrophobic microporous surfaces, *Colloids and Surfaces, A*, 1994, 90(1), s. 1–8.
- [9] Chung B.J., Kwon Y.W.: Relationship between surfactant properties and wettability of rice leaf surfaces for several nonionic surfactants, *Adjuvants Agrichem.*, 1992, s. 37–58.
- [10] Mizerski A., Pazderski K., Sobolewski M., Zaleski B., Zwolińska D.: Problemy zwilżania materiałów hydrofobowych, *Biuletyn Informacji Technicznej*, 3, 1989.
- [11] Neffe S., Mizerski A.: Kinetyka zwilżania warstw rozdrobnionych materiałów węglowych wodnymi roztworami dodecylosiarczanu sodu, *Przemysł Chemiczny*, 2, 2001.
- [12] Mizerski A.: Krytyczna ocena metod pomiaru zdolności zwilżających wodnych roztworów substancji powierzchniowo czynnych, *Archiwum Spalania*, 2, 2002.
- [13] Mizerski A., Sobolewski M.: Pomiary kątów granicznych zwilżania materiałów porowatych i sypkich metodą Washburne’a, *Zeszyty Naukowe SGSP*, 29, 2003.

- [14] Santanu Paria, Kartic C. Khilar: A review on experimental studies of surfactant adsorption at the hydrophilic solid–water interface, *Advances in Colloid and Interface Science*, 110 (2004) 75–95.
- [15] Simončič B., Rozman V.: Wettability of cotton fabric by aqueous solutions of surfactants with different structures, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 292 (2007) 236–245.

SUMMARY

mgr inż. Jakub JAKUBIEC

dr hab. inż. Andrzej MIZERSKI

THE STUDY OF THE KINETICS OF CAPILLARY SATURATION OF COTTON FABRICS WITH SOLUTIONS OF SURFACTANTS

The results of research on capillary absorption on cotton fabric by surfactant solutions concentrates were presented. Four model concentrates similar in composition (kinds of components and quantity) to extinguishing agents were made. Each of the concentrates contained just one surfactant, organic solvent, foam stabilizer and water. Three characteristics of surfactants were studied: cation, amphoteric and non-ion. Fabrics were saturated with the 0,5% and 1,0% volume concentrates. The difference between wettability of researched surfactants on cotton fabric were shown and results were compared to literature studies and theoretical kinetics surfactant solutions absorption curves.