

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. PRZEDMOWA	9
2. WPROWADZENIE DO REOLOGII I REOMETRII.....	11
2.1. Definicja reologii	11
2.2. Historia reologii	12
2.3. Kierunki badań reologicznych	15
2.4. Podstawowe pojęcia reologiczne	15
2.4.1. Naprężenie	15
2.4.2. Odształcenie.....	17
2.4.3. Szybkość ścinania	18
2.4.4. Pojęcie lepkości płynu	20
2.4.6. Krzywe płynięcia i krzywe lepkości.....	25
2.4.7. Liczba Debory	26
2.5. Klasyfikacja płynów	28
3. PŁYNY NIENEWTONOWSKIE	30
3.1. Płyny nienewtonowskie reologicznie stabilne	33
3.1.1. Płyny nienewtonowskie rozrzedzane ścinaniem	33
3.1.2. Płyny nienewtonowskie zagęszczane ścinaniem	37
3.1.3. Płyny z granicą płynięcia.....	40
3.1.4. Koncepcja uogólnionego płynu newtonowskiego	42
3.2. Efekty pamięci płynu	45
3.3. Płyny sprężystolepkie	46
3.4. Płyny reologicznie niestabilne	56
3.5. Lepkość wzdłużna.....	61
4. OGÓLNE ZASADY POMIARÓW WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH PŁYNÓW	69
5. REOMETRY ROTACYJNE.....	74
5.1. Układ pomiarowy o współosiowych cylindrach	75
5.1.1. Płyn newtonowski.....	78
5.1.2. Płyn spełniający prawo potęgowe	80
5.1.3. Metoda Kriegera	85
5.2. Układ pomiarowy stożek-płytką	86
5.3. Układ pomiarowy płytka-płytką	88
5.4. Cylinder wirujący w nieograniczonej objętości płynu.....	90
5.5. Efekty uboczne występujące w reometrach rotacyjnych	91
5.5.1. Układ cylindrów współosiowych	91
5.5.1.1. Efekty końcowe i brzegowe	91
5.5.1.2. Efekty cieplne.....	92
5.5.1.3. Efekty przyścienne	93
5.5.1.4. Zakłócenia laminarnego charakteru ruchu płynu	96
5.5.2. Układ pomiarowy stożek-płytką.....	97

5.5.2.1.	Zjawiska w sąsiedztwie krawędzi stożka	97
5.5.2.2.	Ustawienie stożka pomiarowego w stosunku do płytki	98
6.	REOMETRY KAPILARNE	100
6.1.	Zasada działania i krótka charakterystyka reometrów kapilarnych	100
6.2.	Teoria laminarnego przepływu płynu nienewtonowskiego przez przewody cylindryczne	103
6.3.	Efekty uboczne i sposoby ich korygowania	109
6.3.1.	Zjawiska przyścienne	110
6.3.2.	Przepływ burzliwy	114
6.3.3.	Wpływ ciśnienia i dyssypacji energii	114
6.3.4.	Obliczanie spadku ciśnienia wywołanego oporami uformowanego przepływu płynu przez kapilarę	122
6.4.	Dobór wymiarów kapilary	127
6.4.1.	Długość kapilary	128
6.4.2.	Średnica kapilary	129
7.	WISKOZYMETRY	131
7.1.	Wiskozymetry wypływowe	131
7.1.1.	Wiskozymetr Forda	131
7.1.2.	Wiskozymetry Englera, Saybolta i Redwooda	132
7.1.3.	Wskaźnik płynięcia	134
7.2.	Wiskozymetry przepływowe – Ostwalda i Ubbelohde’a	135
7.3.	Wiskozymetry z ruchomym elementem pomiarowym	137
7.3.1.	Wiskozymetry z przemieszczającym się liniowo elementem pomiarowym	137
7.3.1.1.	Wiskozymetr Hoepplera	137
7.3.1.2.	Penetrometry	139
7.3.2.	Wiskozymetry z obracającym się elementem pomiarowym	140
7.3.2.1.	Wiskozymetry z wirującym mieszadłem	140
7.3.2.2.	Wiskozymetry z układem pomiarowym ślimak-dyfuzor	144
8.	BADANIA WŁAŚCIWOŚCI SPRĘŻYSTOLEPKICH PŁYNÓW	148
8.1.	Pomiary różnicy naprężeń normalnych	150
8.1.1.	Bezpośredni pomiar naprężeń normalnych	150
8.1.2.	Określenie różnicy naprężeń normalnych na podstawie pomiaru wielkości efektu Barusa	153
8.1.3.	Metoda określania różnicy naprężeń normalnych na podstawie pomiarów oscylacyjnych	155
8.1.4.	Metody oparte na pomiarach krzywej płynięcia	155
8.2.	Badania wykorzystujące przepływy jednokierunkowe nieustalone o parametrach zmieniających się w czasie	159
8.2.1.	Pełzanie i powrót	160
8.2.2.	Relaksacja	170
8.3.	Badania oscylacyjne	172

9.	POMIARY LEPKOŚCI WZDŁUŻNEJ.....	183
9.1.	Jednoosiowe rozciąganie próbki	183
9.2.	Pomiar lepkości wzdluznej metoda sciskania próbki płynu	185
9.3.	Reometr typu spin-line.....	186
9.4.	Syfon bezprzewodowy.....	188
9.5.	Metoda pomiaru za pomocą dwóch dysz zanurzonych w cieczy	189
9.6.	Wpływ cieczy ze zbiornika przez ostrobrzeżny okrągły otwór	190
9.7.	Przepływ w przewodzie stożkowym.....	191
9.8.	Porównanie różnych metod określania lepkości wzdluznej.....	193
10.	POMIARY GRANICY PŁYNIĘCIA	195
11.	WYZNACZANIE WŁAŚCIWOŚCI TIKSOTROPOWYCH CIECZY	202
11.1.	Metoda skoku szybkości ścinania	203
11.2.	Metoda wielokrotnych, skokowych zmian szybkości ścinania.....	205
11.3.	Test pętli histerezy	207
12.	WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE POWIERZCHNI CIECZY	210
12.1.	Podstawowe definicje	212
12.2.	Pomiar lepkości powierzchniowej	213
13.	WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE EMULSJI	218
13.1.	Struktura emulsji.....	218
13.1.1.	Klasyfikacja układów emulsyjnych.....	219
13.1.2.	Udział objętościowy fazy wewnętrznej.....	220
13.1.3.	Maksymalny udział objętościowy fazy wewnętrznej.....	221
13.2.	Wpływ wybranych parametrów na właściwości reologiczne emulsji ..	224
13.2.1.	Wpływ przebiegu procesu emulgowania.....	224
13.2.2.	Wpływy parametrów charakteryzujących strukturę emulsji ..	226
13.2.3.	Wpływ udziału objętościowego fazy wewnętrznej	227
13.2.4.	Wpływ średniej średnicy kropeł fazy wewnętrznej	231
13.2.5.	Wpływ maksymalnego udziału fazy wewnętrznej.....	233
13.2.6.	Wpływ emulgatora oraz parametrów fizykochemicznych faz tworzących emulsje	235
13.3.	Modele opisujące właściwości lepkie emulsji	237
13.3.1.	Podział modeli	237
13.3.2.	Modele teoretyczne i półempiryczne opisujące właściwości lepkie emulsji.....	238
13.3.3.	Modele empiryczne opisujące właściwości lepkie emulsji.....	247
13.4.	Modele opisujące właściwości lepkosprężyste emulsji	253
14.	MIKROREOLOGIA	261
14.1.	Wprowadzenie	261
14.2.	Techniki pomiarowe stosowane w badaniach mikroreologicznych.....	263
14.2.1.	Mikroreologia przepływowa.....	264
14.2.2.	Pasywna mikroreologia optyczna	268
14.2.3.	Aktywna mikroreologia optyczna	282
15.	ELEKTRO- I MAGNETOREOLOGIA.....	289
	LITERATURA CYTOWANA.....	295

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA	299
SŁOWNIK WYBRANYCH TERMINÓW REOLOGICZNYCH.....	300
HISTORIA ROZWOJU REOLOGII	303
INDEKS	306

1. PRZEDMOWA

W wielu procesach technologicznych surowcami, półproduktami oraz produktami są płyny o złożonych właściwościach reologicznych zwane płynami nienewtonowskimi. Występują one w takich gałęziach przemysłu jak przetwórstwo tworzyw sztucznych, włókien chemicznych, przemysł petrochemiczny, farb i lakierów, farmaceutyczny, kosmetyczny, celulozowo-papierniczy, poligraficzny, przemysł spożywczy oraz w wybranych procesach biotechnologicznych i zagadnieniach inżynierii środowiska.

Wzrastająca szybko liczba nowych, złożonych technologii stosowanych w wielu gałęziach przemysłu powoduje, że liczba nowo wytwarzanych płynów nienewtonowskich rośnie w bardzo szybkim tempie. Płyny takie ze względu na swoje specyficzne właściwości stwarzają poważne problemy przetwórcze w wielu procesach technologicznych.

Jest więc rzeczą oczywistą konieczność precyzyjnego określania złożonych właściwości reologicznych takich płynów i na tej podstawie projektowanie lub modelowanie procesów technologicznych z ich udziałem. Określanie właściwości reologicznych płynów zajmuje się dział reologii zwany reometrią.

Obserwowany w ostatnich latach intensywny rozwój mikro i nanotechnologii w naturalny sposób wymusił konieczność badania właściwości mediów występujących w procesach realizowanych w mikroskali. Objętości mediów w takich procesach są w oczywisty sposób o kilka rzędów wielkości mniejsze niż w tradycyjnych technologiach realizowanych w makroskali. W ścisłym związku z rozwojem mikromechaniki płynów (nazywanej również mikrofluidiką) oraz mikro i nanotechnologii powstała z naturalnej potrzeby badań właściwości reologicznych płynów w mikroskali najnowsza gałąź reologii zwana mikroreologią.

Na polskim rynku literatury naukowo-technicznej nie ma w chwili obecnej książki omawiającej zagadnienia dotyczące podstaw reologii i mikroreologii oraz metodyki pomiarów złożonych właściwości reologicznych płynów w makro i mikroskali. Niezbyt liczne nakłady trzech podstawowych książek z tej dziedziny wydanych w Polsce w latach 1973, 1995 i 2009 zostały dawno wyczerpane i są praktycznie nieosiągalne.

Autorzy mają nadzieję, że prezentowana książka przedstawiająca bardzo szerokie spektrum podstaw pomiarów reometrycznych zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej oraz uwzględniająca najnowsze trendy badań reologicznych – w tym mikroreologię – w pewnym stopniu zapełni tę lukę.

W książce zdefiniowano podstawowe pojęcia reologii i reometrii oraz scharakteryzowano właściwości szerokiej gamy płynów nienewtonowskich.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono podstawy teoretyczne pomiarów właściwości reologicznych realizowanych za pomocą reometrów rotacyjnych i kapi-

larnych oraz klasyczne metody pomiaru lepkości płynów przy użyciu różnego typu viskozymetrów.

Omówiono również metody pomiaru specyficznych właściwości reologicznych, takich jak: różnica naprężeń normalnych, lepkość wzdłużna, granica płynięcia, właściwości tiksotropowe. Przedstawiono techniki pomiarowe stosowane przy badaniu właściwości reologicznych układów dyspersyjnych, powierzchni cieczy, emulsji oraz płynów magneto- i elektroreologicznych. Po raz pierwszy w polskiej literaturze reologicznej przedstawiono zagadnienia wchodzące w zakres badań najnowszej gałęzi reologii, a mianowicie mikroreologii.

Prezentowana książka jest przeznaczona dla pracowników inżynierijno-technicznych wielu gałęzi przemysłu, w których występują płyny nienewtonowskie oraz dla studentów wyższych lat studiów wydziałów inżynierii chemicznej i procesowej, chemicznego, mechanicznego, technologii żywności oraz pracowników wyższych uczelni, instytucji naukowo-badawczych i biur projektów.

Miłym obowiązkiem autorów jest podziękowanie wszystkim, którzy przyczynili się do powstania tej książki. Wyrazy wdzięczności należą się dr. inż. Piotrowi Domagalskiemu z Katedry Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej za współautorstwo rozdziału dotyczącego mikroreologii. Gorące podziękowanie pragniemy także przekazać dr. inż. Wojciechowi Strzeleckiemu pracownikowi wyżej wymienionej Katedry za wkład pracy w przygotowanie rysunków oraz tekstu maszynopisu.

Jesteśmy również niezmiernie wdzięczni Recenzentom za cenne uwagi, które pomogły nam w zredagowaniu końcowej wersji książki.

Autorzy

Łódź, wrzesień 2014

Podziękowanie

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki jako element projektu badawczego nr NN 209 764640 p.t.: „Mikroreologia optyczna – nowe narzędzie do badań właściwości reologicznych płynów w skali mikro”.

Wyrazy podziękowania kierujemy do sponsorów za współudział w dofinansowaniu wydania książki. Były nimi następujące firmy: Anton Paar Polska, RHL Service, Uni-Export Instruments, F.H.P.U. Arpel Łódź oraz Rheotest Medingen (Niemcy).