

Lp.	Temperatura °C	Lepkość kg/m·s η	$\frac{\eta}{T}$ [T w °K]
1	0	$17,1 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$
2	50	19,5	1,08
3	100	21,8	1,13
4	300	29,4	1,23
5	500	35,8	1,29

Tabela 5.2. Wartości współczynnika lepkości dla powietrza w funkcji temperatury przy ciśnieniu atmosferycznym.

2.5. Lepkość cieczy.

W cieczy, w odróżnieniu od gazów, przekazwanie pędu odbywa się za pośrednictwem sił przyciągania między jej molekułami. Molekuły z sąsiednich cieczy poruszających się z różnymi prędkościami przyciągają się między sobą.

Powoduje to z jednej strony hamowanie warstw szybszej, a z drugiej strony przyspieszenie warstw wolniejszej. Przemieszczenie poszczególnych cząstek lub warstw cząstek ciała względem siebie napotyka na opór sił spójności, przy czym im większe siły spójności, tym większe są opory tarcia ζ wewnętrznego.

Przepływ można określić jako proces scinania cieczy:

$$v_{sc} = \frac{dr}{dt} \quad (27.2.)$$

gdzie : r - odkształcenie spowodowane przez scinanie.

Prędkość scinania (27.2.) charakteryzująca powstawanie odkształceń w czasie jest funkcją naprężenia stycznego ζ_t :

$$v_{sc} = f(\zeta_t)$$

Jeśli napężenie scinające $\dot{\gamma}$ jest proporcjonalne do gradientu prędkości cieczy, wówczas ogólne równanie reologiczne / reologia - nauka o płynięciu i deformacji wszystkich form materii pod wpływem naprężeń / przybiera postać równania Newtona :

$$\dot{\gamma} = \eta \frac{dv}{dt} \quad (28.2.)$$

lub zgodnie z równaniem na napężenia scinające $\dot{\gamma} = \frac{F}{S}$ otrzymamy :

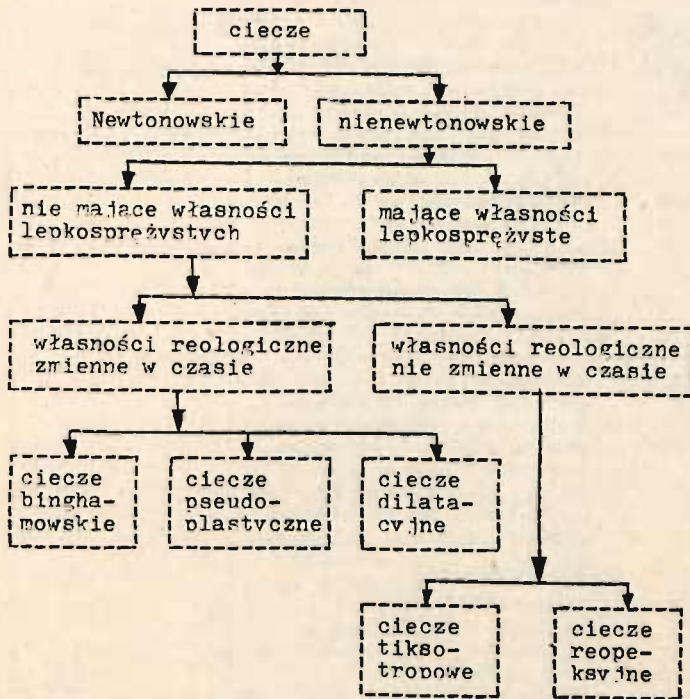
$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dt} \quad (29.2.)$$

Ciecze stosujące się do równania (28.2.) lub (29.2.) nazywamy cieczami newtonowskimi. Dla tych cieczy prędkość scinania v_{sc} jest równoznaczna z gradientem prędkości warstewki cieczy,

$$v_{sc} = \frac{dv}{dt}$$

a więc charakteryzuje rozkład prędkości w warstwie cieczy. Lepkość dla tych cieczy jest tylko funkcją temperatury i ciśnienia, a nie zależy od prędkości scinania. Linia płynięcia cieczy newtonowskich jest linią prostą.

Ciecze możemy podzielić ogólnie na ciecze newtonowskie i nienewtonowskie, przy czym ciecze nienewtonowskie, są to ciecze których krzywe płynięcia nie są liniami prostymi, a ich lepkość często jest nazywana lepkością pozorną lub strukturalną. Taki podział cieczy ma charakter umowny, gdyż każda ciecz newtonowska zachowuje się w określonych warunkach fizycznych / zależnie od temperatury, ciśnienia, prędkości scinania itp. / jak ciecz nienewtonowska. Reologiczny podział cieczy przedstawiono na rys. 9.2. a ich ogólne własności i charakterystyki w tabeli 6.2.



Rys. 9.2. Reologiczny podział cieczy.

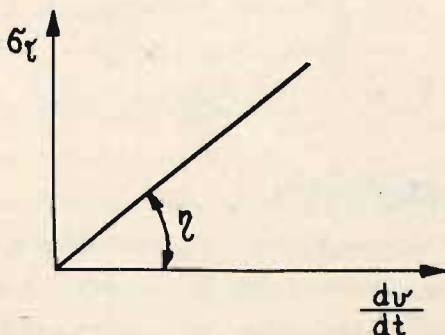
Tabela 6.2. Własności i charakterystyka cieczy.

Lp.	Nazwa cieczy	Własności i krótka charakterystyka	Przykłady
1	newtonowskie	Prędkość ścinania $v_{sc} = \frac{dv}{dy}$ jest równoznaczna z gradientem prędkości warstewki cieczy. Ciecze stosujące się do równania Newtona. Lepkość jest tylko funkcją temperatury i ciśnienia, a nie zależy od prędkości ścinania. Krzywa płynięcia jest linią prostą / rys. .2./.	Ciecze o małej i średniej masie cząsteczkowej oraz roztwory substancji o małej masie cząsteczkowej.

2	binchamowska ciecz Bincha- ma, ciecz plastyczna	Ciecz, która zaczyna płynąć wówczas, gdy naprężenie styczne, między dwiema warstwami cieczy przekroczy pewną wartość graniczną τ_{gr} . Po przekroczeniu τ_{gr} struktura wewnętrzna ulega zniszczeniu i ciecz zachowuje się jak ciecz newtonowska. Z chwilą, gdy naprężenie styczne zmniejszą się poniżej τ_{gr} , to struktura wewnętrzna zostaje odbudowana.	pasty różnego rodzaju, zawiesiny farby.
3	pseudoplastyczna	nie ma granicy płynięcia. Lepkość pozorna maleje ze wzrostem prędkości scinania. Ciecze takie mają zazwyczaj niesymetrycznie zbudowane czastki np. o wydłużonym kształcie liniowym. W miarę zwiększenia prędkości scinania czastki te przyjmują uporządkowane ułożenie, wskutek czego zmniejsza się opór tarcia a więc i lepkość	
4	Ciecz dylatacyjna	nie ma granicy płynności. Lepkość pozorna rośnie w miarę wzrostu prędkości scinania. Podczas szybkiego scinania zawiesiny, ciecz spełniająca rolę smaru między czastkami zawieszonymi zostaje wyparta i opór scinania rośnie.	mokry piasek
5	Ciecz tiksotropowa	Pod wpływem scinania następuje rozpad struktury wewnętrznej. Im dłużej działa naprężenie scinania, tym większe następuje zniszczenie struktury. Pozostawienie cieczy w spokoju powoduje odbudowę struktury wewnętrznej. Można uważać ją za taką ciecz pseudoplastyczną, której uporządkowanie czasteczek podczas przepływu zachodzi w czasie.	smary plastyczne, których lepkość pozorna zmniejsza się gdy noddane zostaną oddziaływaniom niechemicznym.

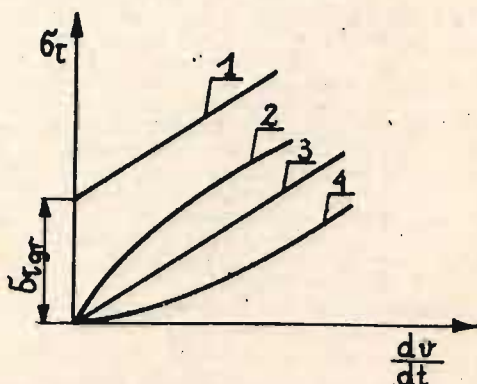
6	Ciecze reopeksyjne	Pod wpływem scinania następuje tworzenie struktur wewnętrznej.	W praktyce bardzo rzadko spotykane.
7	Ciecze lepkością sprężyste	Ciecze o bardzo dużej lepkości, a jednocześnie wykazujące nowe własności sprężyste. Jako bardzo lepka ciecz zachowuje się zgodnie z prawem Newtona, a ze względu na własności sprężyste - zgodnie z prawem Hooke'a.	różnego rodzaju żywice, smoły, asfalty, niektóre polimery, itp.

Charakter płynięcia cieczy, których własności reologiczne nie zmieniają się w czasie przedstawiono na rys. 10.2. i na rys. 11.2..



Rys.10.2. Linia płynięcia cieczy newtonowskiej.

Tangens kąta nachylenia prostej odpowiada lepkości cieczy.



Rys.11.2. Krzywe płynięcia dla cieczy nienewtonowskich.

1 - ciecz binghamowska, 2 - ciecz pseudoplastyczna, 3 - ciecz newtonowska, 4 - ciecz dylatacyjna.

2.5.1. Modele reologiczne.

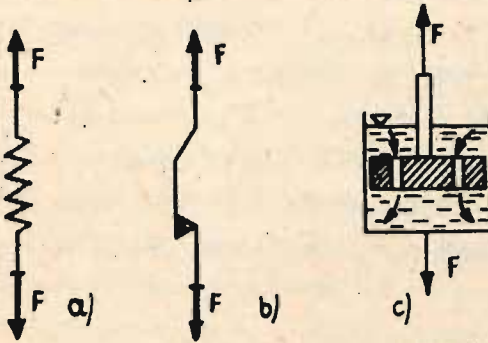
Odształcenie większości materiałów zachodzi faktycznie w szerokim zakresie między zachowaniem doskonale sprężystym a idealnie plastycznym. Własności reologiczne ciał można zobrazować przy pomocy modeli / analogów / mechanicznych. Dają one dużą pogladowość w przedstawieniu zjawisk, niemniej jednak spostrzeżenia oparte na ich funkcjonowaniu mają na ogół charakter jakościowy. Łączy to się z niemożnością skonstruowania modelu, który zachowywałby się jak ciecz.

Modele reologiczne składają się ze sprzężen reprezentujących cechy sprężyste materiałów i z tłumików odzwierciedlających cechy lepkie. Mogą być wprowadzone jeszcze suwaki, które obrazują tarcie suche, odpowiadające odształceniom plastycznym.

W modelach tych traktuje się przyłożoną siłę jako analogię naprężenia, a wydłużenie jako analogię odkształcenia.

Modelem mechanicznym ciała doskonale sprężystego Hooke'a jest spiralna sprężyna / rys.12.2.a./

Przyłożenie do niej siły powoduje natychmiastowe jej wydłużenie proporcjonalne do wielkości tej siły, natomiast odjęcie siły - natychmiastowy powrót sprężyny do stanu pierwotnego.



Rys.12.2. Modele ciała doskonale :

- a/ sprężystego Hooke'a
- b/ ciała plastycznego St. Venanta
- c/ lepkiej cieczy Newtona.

Modelem mechanicznym ciała doskonale plastycznego St. Venanta jest suwak / rys.12.2.b. /.

Przyłożona siła spowoduje jego wydłużenie dopiero po przekroczeniu pewnej wartości granicznej, równej sile tarcia statycznego suwaka. Wydłużenie od tego momentu przebiega pod działaniem tej stałej siły, a po jej odjęciu suwak nie powraca do położenia pierwotnego.

Za model mechaniczny cieczy doskonale lepkiej Newtona przyjęto tłumik hydrauliczny, składający się z dziurkowanego tłoka, poruszającego się w cylindrze wypełnionym lepka cieczą / rys.12.2.c. /.

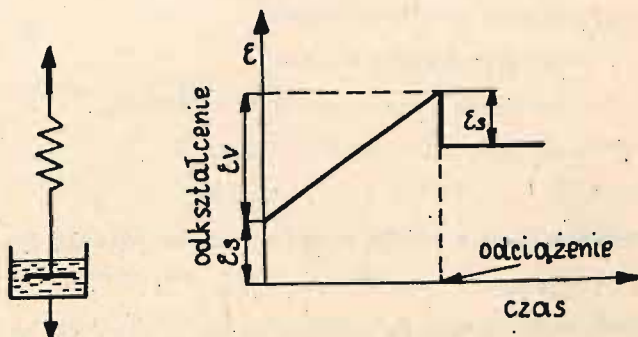
Przyłożona siła powoduje natychmiastowe przesuwanie się

tłoka, hamowanego jednak oporem cieczy przepychanej przez znajdujące się w nim otwory. Po odjęciu siły tłok nie wraca do pozycji wyjściowej.

Łącząc w zestawy przedstawione trzy podstawowe modele mechaniczne, dochodzi się do układów naśladujących zachowanie się ciał o złożonych własnościach reologicznych.

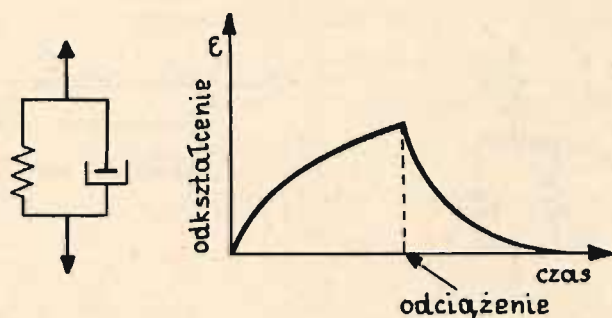
I tak przy szeregowym zestawieniu dwóch elementów, mianowicie sprężyny i tłumika, otrzymuje się model mechaniczny cieczy Maxwella / rys. 13.2. /. Przyłożona siła powoduje natychmiastowe odkształcenie sprężyste ϵ_s , po którym następuje jednorodne płynięcie / odkształcenie lepkosprężyste ϵ_v /, a po odciążeniu mamy natychmiastowe odkształcenie sprężyste i liniowa zależność odkształcenia lepkosprężystego.

Ciało Maxwella stanowi więc szczególny przypadek cieczy lepkosprężystej.



Rys. 13.2. Model Maxwella i jego charakterystyka odkształceniowa.

Model Voigta - Kelvinina powstaje przez równoległe połączenie sprężyny i tłoka / rys. 14.2. /.

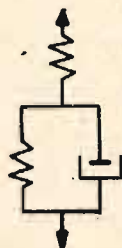


Rys.14.2. Model Voigta - Kelvina i jego charakterystyka odkształceniowa.

Charakteryzuje się on opóźnioną sprężystością, gdyż wskutek przyłożonej siły następuje wydłużenie sprężyny i przesuw tłoka w tłumiku. Przepływ lepkiej cieczy w tłumiku powoduje zarówno przemieszczanie się tłoka jak i wydłużenia sprężyny. Po odciążeniu sprężyna powraca do pierwotnej długości również z opóźnieniem wywołanym przepływem cieczy lepkiej w tłoku. Model Voigta - Kelvina jest analogia lepkosprężystego ciała stałego, gdyż nie jest zdolny do nieograniczonego i nieodwracalnego płynięcia.

Różne modyfikacje prostych elementów Maxwella i Voigta - - Kelvina mogą pozorować lepkosprężyste właściwości pewnych rodzajów materiałów w szczególnych warunkach pracy.

Szeregowe połączenie sprężyny z elementem Voigta-Kelvina prowadzi do otrzymania modelu dającego dobre przybliżenie zachowania się sieciowego polimeru / gumy / / rys.15.2. /. Przez dodanie tłumika jako czwartego elementu, otrzymuje się model, który uwzględnia permanentne płynięcie jako dodatkową postać odkształcenia lepkosprężystego / rys.16.2./.



Rys.15.2. Model Kelvina - Voigta
uzupełniony jednym
elementem sprężystym.



Rys.16.2. Model uwzględniający
permanentne płynięcie
ciał lepkoplastycznych.

Model ten opisuje na przykład pewne formy zachowania się polimerów krystalicznych, w których pozostaje odkształcenie szczątkowe.

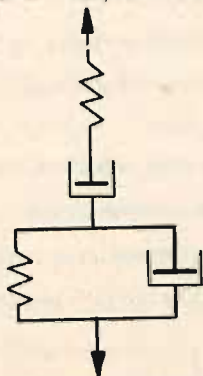
Właściwości reologiczne niektórych farb dość dobrze odtwarza model mechaniczny Bingham'a, reprezentujący ciała sprężysto-
- plastycznie - lepkie. / rys.17.2. /.



Rys.17.2. Model Bingham'a.

Przy małych naprężeniach stycznych zachowuje się on, jak ciało stałe, natomiast przy dużych - jak ciecz.

Ciecze lepkosprężyste są reprezentowane również przez model mechaniczny Burgersa, będący szeregowym połączeniem modeli Maxwella i Voigta - Kelvina / rys.18.2. /.



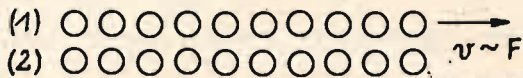
Rys.18.2. Model Burgersa.

Dla określonych warunków pracy powinien być skonstruowany określony model, przy czym na podstawie wartości jego parametrów, takich jak moduł Younga E , lepkości η , można przewidzieć zachowanie się materiału pod warunkiem, że odkształcenia nie są zbyt duże. Odkształcenie każdego elementu lub jego parametry mogą być obliczone oddzielnie i dodane do siebie, co pozwala na przewidzenie ogólnego efektu lepkosprężystego zachowania się materiału.

2.5.2. Zależność lepkości cieczy od temperatury.

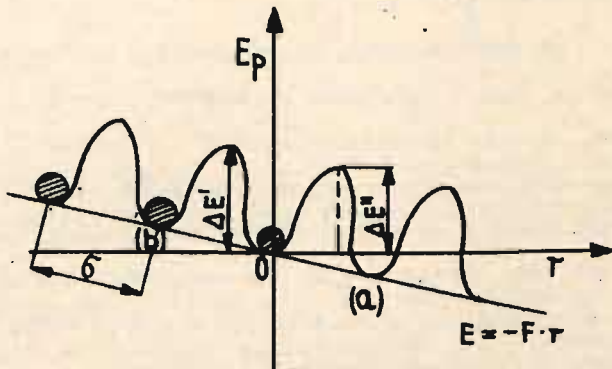
W czasie ruchu warstw cieczy (1) przesuwającej się z prędkością v względem nieruchomej warstwy molekuł cieczy (2), zostają pociągnięte molekuly z warstwy nieruchomej (2)
/ rys.19.2. /.

Przejawia się to w obniżeniu względnym barier energii potencjalnej / energii aktywacji /.



Rys.19.2. Ruch warstw (1) poruszającej się z prędkością v względem nieruchomej warstwy (2).

Wzajemne przyciąganie molekuł z warstwy ruchomej (1) i nie - ruchomej (2) powoduje, że prawdopodobieństwo przeskoku dowolnej molekuły z położenia (0) w położenie (a) jest bardziej prawdopodobne niż przeskok w położenie (b) / rys.20.2. /.



Rys.20.2. Schemat molekularnego mechanizmu lepkości cieczy.

Różnica energii aktywacji $\Delta E' - \Delta E''$ równa jest pracy siły F na odcinku równym odległości dwóch sąsiednich minimów, odpowiadające średniej odległości δ między molekułami.

Mamy więc :

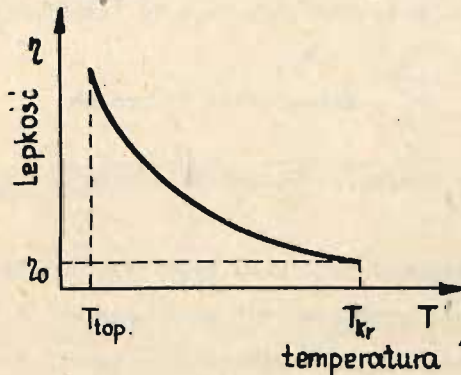
$$\Delta E' - \Delta E'' = F \cdot \delta \quad (30.2.)$$

Dla niedużych wartości sił zewnętrznych F można wykazać, że średnia prędkość v jest proporcjonalna do tej siły i wówczas wyrażenie na współczynnik lepkości cieczy przyjmie postać :

$$\eta = \frac{2\tau_0}{\delta^3} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}} = \frac{2kT}{\delta^3} \cdot \tau \quad (31.2.)$$

Z wzoru (31.2.) wynika, że ze wzrostem temperatury silnie zmniejsza się lepkość cieczy. Zależność wykładnicza $e^{\frac{\Delta E}{kT}}$ przeważa nad zależnością liniową $\frac{2\tau_0 k}{\delta^3} \cdot T$.

Wzrost temperatury powoduje skrócenie czasu życia osiadłego molekuly τ , z drugiej zaś strony zwiększa średnia odległość δ między molekułami. W miarę większego oddalania cząsteczek, oddziaływanie między nimi maleje szybko do zera i wówczas dominujący wpływ na lepkość ma ruch cieplny. W konsekwencji obniży się lepkość cieczy. Ogólnie rzecz biorąc, im cząsteczki są większe i im bliżej są sobie, tym ciecz ma większą lepkość. Na wykresie rys.21.2. zależność lepkości cieczy od temperatury przedstawia się jako krzywa wykładnicza.

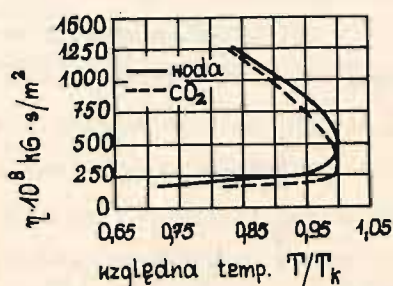


Rys.21.2. Zależność lepkości cieczy od temperatury.

T_{kr} - temperatura krytyczna

Podane powyżej wzory na zależność lepkości od temperatury mają sens tylko w określonym przedziale temperatur: od punktu topnienia T_{top} do temperatury krytycznej T_{kr} , powyżej której ciecz istnieć nie może.

Współczynnik lepkości ciekłych maleje ze wzrostem temperatury, natomiast współczynnik lepkości gazów rośnie z temperaturą. W punkcie krytycznym współczynnik lepkości cieczy i jej par są jednakowe. Na rys.22.2. przedstawiono zależność od temperatury współczynnika lepkości dla CO_2 i H_2O .

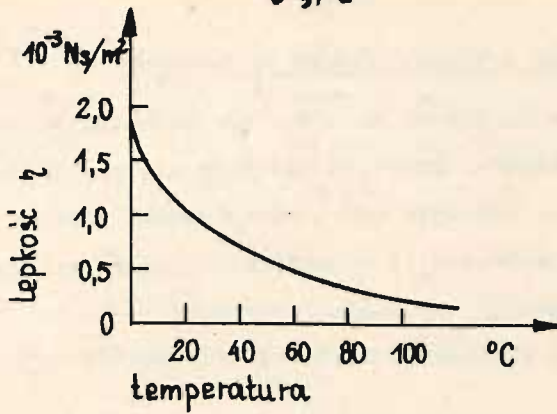


Rys.22.2. Zależność lepkości od temperatury dla CO_2 i H_2O .
 T_k - temperatura krytyczna

Dla przykładu na rys.23.2. podano zależność lepkości wody od temperatury.

Przy obniżaniu temperatury ciecz lepka szybko gęstnieje i przekształca się w bezpostaciowe ciało stałe. Na przykład kalafonia w temperaturze pokojowej jest ciałem stałym, a już przy temperaturze 50 - 70 °C zachowuje się jak substancja ciekła o dużej lepkości rzędu 10^4 - 10^6 P.

Dla porównania konsystencja miodu odpowiada lepkości około $5 \cdot 10^3$ P. Lepkości niektórych ciekłych dla różnych temperatur podano w tabeli 7.2..



Rys.23.2. Zależność lepkości wody od temperatury.

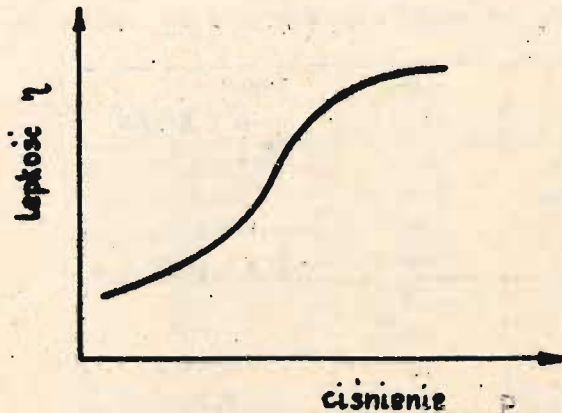
ciecz	temp. °C	lepkość $\eta = 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
alkohol metylowy	-98,3	13,9
	0	0,82
	20	0,597
	50	0,403
woda	0	1,7921
	20	1,005
	50	0,5494
	100	0,2838
rtęć	-20	1,855
	0	1,685
	20	1,554
	100	1,240
	340	0,921
gliceryna	-42	$6,71 \cdot 10^6$
	-20	$1,34 \cdot 10^5$
	0	$1,21 \cdot 10^4$
	20	$1,49 \cdot 10^3$
	30	$6,29 \cdot 10^2$

Tabela 7.2. Lepkości niektórych cieczy w różnych temperaturach.

2.5.3. Zależność lepkości cieczy od ciśnienia.

Wzrost ciśnienia na ciecz powoduje zbliżenie się tej cząsteczek do siebie, przez co zwiększa się oddziaływanie międzycząsteczkowe. Powoduje ono wzrost lepkości cieczy przez wzrost energii aktywacji i odpowiednim zmniejszeniu ruchliwości cząsteczek.

Wpływ ciśnienia na lepkość cieczy przedstawiono na rys.24.2..



Rys.24.2. Zależność lepkości cieczy od ciśnienia.

Przy małych ciśnieniach wzrost lepkości jest nieznaczny, natomiast przy większym ciśnieniu rośnie bardzo wyraźnie. Przy ciśnieniach rzędu kilku tysięcy MPa zaznacza się już wpływ odpychania międzycząsteczkowego i krzywa przyrostu lepkości ze wzrostem ciśnienia dąży asymptotycznie do pewnej stałej wartości. Najczęściej przyjmuje się, że do wartości około 25 MPa zależność ta ma charakter liniowy w postaci:

$$\eta_p = \eta_0 (1 + ap) \quad (32.2.)$$

gdzie : η_p - lepkość dynamiczna przy ciśnieniu p w Pa·s

η_0 - lepkość dynamiczna przy ciśnieniu atm. w Pa·s

a - stała dla danej cieczy.

Dla ciśnień powyżej 25 MPa zaznacza się bardzo znaczny wzrost lepkości. Stosuje się tu wzory uwzględniające wykładniczą zależność lepkości od ciśnienia w postaci :

$$\eta_p = \eta_0 \cdot e^{\alpha p} \quad (33.2.)$$

gdzie : η_0 - stała charakterystyczna dla danej cieczy

α - ciśnieniowy współczynnik lepkości w $1/\text{Pa}$

p - ciśnienie.

Dla przykładu można podać, że w częściach trących maszyn bardzo często występuje ciśnienie rzędu kilku tysięcy MPa. W przekładniach zębatych naciski w obszarach zazębienia mogą osiągnąć wartość kilkuset, a nawet kilka tysięcy MPa.

2.5.4. Zależność lepkości cieczy od ich budowy chemicznej.

Różnica pomiędzy lepkością zwykłych cieczy i amorficznych szklistych ciał stałych sprowadza się w zasadzie tylko do wielkości lepkości, a mianowicie do wzrostu lepkości dla tych ciał o 12 - 15 rzędów wartości. Im większe cząsteczki składają się na cząsteczki cieczy, tym silniejsze są oddziaływania międzycząsteczkowe, a więc większe siły kohezji, a tym samym i większa lepkość. Na lepkość ma bezpośredni wpływ nie tylko wielkość cząsteczek ale również to, z jakich atomów są one zbudowane oraz jak wyglądają ich przestrzenne rozmieszczenie wewnątrz cząsteczki.

Zwiększenie rozgałęzienia cząsteczek prowadzi na ogół do zwiększenia lepkości, gdyż przy wzajemnym względnym przemieszczaniu się cząsteczki zaczepiają się rozgałęzieniami, przez co hamują ruch cząsteczek. Bardzo lepkie są substancje zawierające grupy polarne lub pierścienie w cząsteczce. Smary zawierające węglowodory naftenowe odznaczają się dużą lepkością. Lepkość niektórych cieczy przy temperaturze 20 °C przedstawiono w tabeli 8.2..

Ciecz	lepkość $\eta = 10^{-3} \text{ M}\cdot\text{s/m}^2$
eter etylowy	0,243
alkohol etylowy	1,19
gliceryna	1499
benzen	0,65
nitrobenzen	2,01
fenol	11,6

Tabela 8.2. Lepkość niektórych cieczy w temperaturze 20 °C.

2.5.5. Lepkość emulsji i zawiesin.

Zarówno w przypadku emulsji / układu dwóch nie mieszających się ze sobą cieczy, z których jedna jest rozproszona w drugiej pod postacią kropelek /, jak i zawiesin / układ dwóch nierozpuszczalnych w sobie ciał, z których jedno jest cieczą zawieszająca drobne czastki ciała stałego / istnieje podobna sytuacja.

Mianowicie w cieczy mamy rozdrobnione czastki obcego ciała, którymi mogą być kropelki drugiej cieczy lub czastki ciała stałego. Pod wpływem działania sił ściągających następuje przemieszczenie się cieczy dyspergującej względem ciała dyspergowanego. Mamy więc tu do czynienia nie tylko z tarciem wewnętrznym, ale również z tarciem zewnętrznym na granicy rozdziálu faz. Lepkość wzrasta tu bardzo znacznie ze względu na duże powierzchnie rzeczywistego kontaktu powodujące powstanie dużych sił międzycząsteczkowych.