DISPERZNÍ SOUSTAVY

soustavy, které obsahují alespoň dva druhy hmoty (dvě fáze nebo dvě složky),
jeden druh je rozptýlen ve druhém ve formě více nebo méně jemných částic.

disperzní podíl rozptýlený druh

disperzní prostředí spojitý druh

Klasifikace disperzních soustav

- podle ***počtu fází***: homogenní
  heterogenní: podle skupenství → disperzního prostředí, disperzního podílu
- podle ***velikosti částic***: **hrubě disperzní**
  koloidně disperzní
  analyticky disperzní
- podle ***tvaru částic***: **globulárně** disperzní (izometrické částice)
  laminárně disperzní (anizometrické částice, jeden rozměr je řádově menší)
  fibrilárně disperzní (anizometrické částice, jeden rozměr je řádově větší)
- podle ***interakcí mezi disperzním prostředím a disperzními částicemi***:
  lyofilní - výrazná afinita mezi částicemi a prostředím
  lyofobní - velmi nízká afinita mezi částicemi a prostředím
- podle ***interakcí mezi disperzními částicemi***:
  volné (soly, koloidní roztoky ...)
  vázané (gely, koncentrované suspenze, pasty ..)
- podle ***počtu molekul v disperzní částici***: **molekulární**
  polymolekulární
- podle ***rozdělení velikosti částic***: **monodisperzní** s částicemi o jedné velikosti
  polydisperzní s částicemi různých velikostí

Velikost částice - ***lineárním rozměrem***, ***hmotností***, ***objemem***,***plochou povrchu,***
stupeň disperzity - poměr povrchu částic k jejich objemu
– je úměrný reciproké hodnotě lineárního rozměru

Rozdělovací funkce velikosti částic → podle rozměrů částic, podle hmotnosti částic

frakce - skupiny částic přibližně stejné velikosti

Diferenciální rozdělovací funkce $F(r)$ - *podíl částic se stejnou velikostí*

$$F_W(r) = \frac{\mathrm{d}\, m_r}{m \cdot \mathrm{d}\, r}, \quad \text{popř.} \quad F_N(r) = \frac{\mathrm{d}\, N_r}{N \cdot \mathrm{d}\, r}$$

Integrální rozdělovací funkce $I(r)$ - *podíl částic s poloměrem rovným nebo větším než určitá zvolená hodnota*

$$I(r) = \int_0^{r_c} F(r)\ \mathrm{d}\, r$$

Doplňkové integrální rozdělovací funkce $Q(r)$ - *podíl částic s poloměrem rovným nebo menším než určitá zvolená hodnota*

$$Q(r) = \int_{r_c}^{\infty} F(r)\ \mathrm{d}\, r$$

Klasifikace disperzních systémů podle velikosti částic

ANALYTICKÉ DISPERZE $d < 10^{-9}$ m	**KOLOIDNÍ DISPERZE** $10^{-9} < d < 10^{-6}$ m	**HRUBÉ DISPERZE** mikro $10^{-6} < d < 10^{-5}$ m makro $d > 10^{-5}$ m
******** **optické vlastnosti** ******** částice nejsou viditelné ani v elektronovém mikroskopu	********** **optické vlastnosti** ********** nejsou viditelné v mikroskopu, ale v ultramikroskopu nebo elektronovém mikroskopu, většinou průhledné, často výrazně barevné, v bočním osvětlení opaleskují (Tyndallův efekt; rozptyl světla)	******** **optické vlastnosti** ******** viditelné pouhým okem nebo v mikroskopu, zákal, neprůhlednost
*** **procházejí filtračním papírem i membránami** ***	********** **procházejí filtračním papírem, ale ne některými membránami** **********	******* **neprocházejí papírem ani membránami** ******
******* **kinetické vlastnosti** ******* • vykonávají velmi intenzivní tepelný pohyb • rychle difundují • nesedimentují ani v ultracentrifuze • vyvolávají velký osmotický tlak	********** **kinetické vlastnosti** ********** • vykonávají slabší tepelný pohyb než analytické disperze, ale intenzivnější než hrubé disperze. Intenzita pohybu roste se stupněm disperzity • pomalu difundují • sedimentují pomalu • vyvolávají malý osmotický tlak (roste se stupněm disperzity, neboť roste počet částic)	******** **kinetické vlastnosti** ********* • vykonávají velmi slabý tepelný pohyb • nedifundují • sedimentují rychle • nevyvolávají osmotický tlak
****** **způsob vzniku a stabilita** ****** ***Molekulární***	********** **způsob vzniku a stabilita** ********** ***Molekulární*** / ***Polymolekulární***	****** **způsob vzniku a stabilita** ****** ***Polymolekulární***
	Roztoky makromolekul	***Asociativní koloidy***	***Heterogenní koloidy***	
• *vznikají samovolným rozpouštěním* (mísitelnost omezená nebo neomezená) • jsou *stálé* • jsou vždy *homogenní*; tvoří jedinou fázi	• *vznikají samovolným rozpouštěním*. Řídí se termodynamikou pravých roztoků, i když velmi neideálních • *stabilitou* se podobají pravým roztokům. • jsou *homogenní*	• *vznikají samovolným rozpouštěním* a následující asociací • jsou *stabilní*	• *nevznikají samovolně*, ale umělým dispergováním nebo srážením • jsou *nestálé* - koagulují, sedimentují, stárnou • jsou *heterogenní*, mají obrovskou *plochu fázového rozhraní*, stoupá se stupněm disperzity	• *nevznikají samovolně*, tuhou látku je nutno mechanicky rozmělnit na částice žádané velikosti a rozptýlit • jsou *nestálé*, samovolně zanikají (sedimentací a koagulací) • jsou vždy *heterogenní*, velikost *plochy fázového rozhraní* je menší než u koloidních systémů
********** **gelatinizace** ********** nenastává	********** **gelatinizace** ********** změna charakteristická pro koloidně disperzní systémy lyofilní a některé lyofobní soly Při koncentracích disperzního podílu vyšších než určitá mez agregují disperzní částice v síťovitou strukturu, která v sobě uzavírá značné množství disperzního prostředí. Spojité je nejen disperzní prostředí, ale i disperzní podíl.	********** **gelatinizace** ********** pouze výjimečně

Střední molární hmotnost

- ***hmotnostně střední molární hmotnost (hmotnostní průměr molárních hmotností)***

  - metodami, které měří veličiny úměrné hmotnosti nebo objemu částice (rychlost difuze, sedimentace, rozptyl světla)

$$\bar{M}_W = \frac{\Sigma(m_i \cdot M_i)}{\Sigma m_i} = \frac{\Sigma(w_i \cdot M_i)}{\Sigma w_i} = \Sigma(W_i \cdot M_i)$$

W_i (= $m_i / \Sigma m_i$) je hmotnostní zlomek jednotlivých frakcí
$w_i = (m_i / V)$ – hmotnostní koncentrace

- ***početně střední molární hmotnost (početní průměr molárních hmotností)***

  - měřením koligativních vlastností (osmometrie, popř. kryoskopie nebo ebulioskopie)

$$\bar{M}_N = \frac{\Sigma(N_i \cdot M_i)}{\Sigma N_i} = \frac{\Sigma(c_i \cdot M_i)}{\Sigma c_i} = \Sigma(x_i \cdot M_i)$$

N_i je počet částic i-tého druhu,
x_i (= $N_i/\Sigma N_i = c_i/\Sigma c_i$) je molární zlomek,
$c_i = (n_i / V) = (N_i / \mathbf{N}_A V) = w_i / M_i$

KINETICKÉ VLASTNOSTI DISPERZNÍCH SOUSTAV

jsou dány tepelným pohybem disperzních částic, jehož intenzita záleží kromě teploty především na velikosti a tvaru částic

DIFUZE - samovolné vyrovnávání koncentrací v soustavách s koncentračním gradientem v důsledku translačního pohybu částic

Rychlost difuze vyjadřována ***difuzním tokem*** $\boldsymbol{J_i^{dif}}$ - látkové množství difundující složky i , které za jednotku času projde jednotkovou plochou kolmou ke směru difuze ve stacionárním prostředí

$\boldsymbol{J_i^{dif}}$ = součin střední rychlosti toku částic, $\boldsymbol{u_i^{dif}}$, a jejich koncentrace $\boldsymbol{c_i}$: $J_i^{dif} = \frac{\mathrm{d}\, n_i}{\mathcal{A} \cdot \mathrm{d}\, \tau} = u_i^{dif} \cdot c_i$

I. Fickův zákon pro jednorozměrnou ***stacionární*** difuzi

$$J_i^{dif} = -D_i \cdot \frac{\mathrm{d}\, c_i}{\mathrm{d}\, x}$$

$\boldsymbol{D_i}$ ***- difuzní koeficient*** [$\mathrm{m^2\ s^{-1}}$] - látkové množství difundující složky i, které projde jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém koncentračním gradientu.

Einsteinova rovnice pro difuzní koeficient

- vztah mezi difuzním koeficientem, koeficientem tření a absolutní teplotou (1908 Einstein)

$$D_i = \frac{k_B\, T}{f_i}$$

Pro **kulovité částice velké proti molekulám rozpouštědla** - ***Stokesova rovnice***

$$f_i = 6\, \pi \cdot \eta_o \cdot r_i$$

Difuze velkých kulovitých částic ve zředěných disperzích s kapalným disperzním prostředím (malé molekuly) –***Einsteinova-Stokesova rovnice***

$$D_i = \frac{k_B\, T}{6\, \pi \cdot \eta_o \cdot r_i}$$

Hodnota difuzního koeficientu

stoupá s teplotou (členem $k_B\, T$, viskozita kapalného disperzního prostředí s teplotou klesá)
klesá se vzrůstající viskozitou prostředí
s rostoucím poloměrem částice

rychlost difuze v ***koloidně*** disperzních systémech je značně menší než u ***analytických*** disperzí a v ***hrubých*** disperzích je neměřitelná

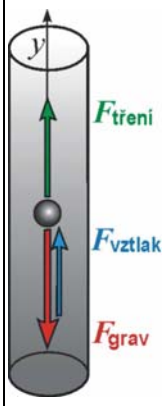
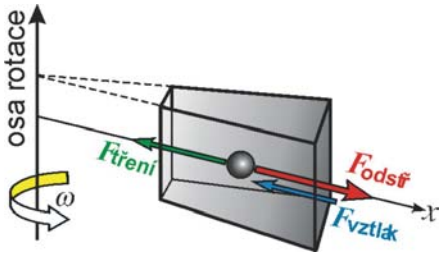
pro ***kulovitou*** částici známého poloměru - difuzní koeficient
nebo ze změřeného difuzního koeficientu vypočítat poloměr
u ***nekulovitých*** částic - ***hydrodynamický poloměr*** - poloměr hydrodynamicky ekvivalentní koule, která má za dané teploty ve stejném disperzním prostředí stejný frikční koeficient.

Sedimentace disperzních systémů

Částice dostatečně velké hmotnosti se působením gravitačního pole usazují – sedimentují, v systému se po určité době ustaví rovnovážné rozdělení částic nebo se všechny částice, jsou-li dostatečně těžké, usadí.

Rychlost sedimentace

$(u_{sed} \gg u_{dif})$

v gravitačním poli	v odstředivém poli
 Vlivem gravitace se částice zpočátku pohybuje zrychleně - při malých rychlostech převyšuje gravitační síla, zmenšená o vztlak. Se zrychlováním pohybu úměrně vzrůstá i třecí síla a v určitém okamžiku se síly vyrovnají: $$v\,g\,\rho - v\,g\,\rho_o - f\,u_{sed} = 0$$	 Silové pole ultracentrifugy může být řádově až 10^6 krát větší než zemská gravitace. Proto je zde sedimentace mnohem rychlejší. V ustáleném stavu je odstředivá síla, zmenšená o vztlak, rovna síle tření: $$v\,\omega^2\,x\,\rho - v\,\omega^2\,x\,\rho_o - f\,u_{sed} = 0$$
V ustáleném stavu se částice pohybuje ***konstantní rychlostí*** $$u_{sed} = \frac{y}{\tau} = \frac{v \cdot g}{f} \cdot (\rho - \rho_o) = \frac{M \cdot g}{N_A \cdot f} \cdot \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho}\right)$$	Částice, vzdalující se při odstřeďování od osy otáčení, se pohybuje ***proměnnou, stále vzrůstající rychlostí*** $$u_{sed} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = \frac{v \cdot \omega^2 \cdot x}{f} \cdot (\rho - \rho_o)$$
Časová závislost výšky, v níž se nachází disperzní částice: $$y = \frac{v\,g}{f}(\rho - \rho_o)\,\tau$$	***Časová závislost vzdálenosti disperzní částice od osy otáčení:*** $$\ln x = \frac{v \cdot \omega^2}{f}(\rho - \rho_o)\,\tau + \text{konst}$$

sedimentační koeficient - rychlost sedimentace v poli o jednotkovém zrychlení (obvykle v sekundách, popř. v jednotkách Svedberg = 10^{-13} s) - vyjádření experimentálních dat získaných měřením rychlosti sedimentace pomocí veličiny nezávislé na síle pole:

$$s = \frac{u_{sed}}{\omega^2 \cdot x} = \frac{\ln\,(x_2 / x_1)}{\omega^2 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}, \text{ popř. } s = \frac{u_{sed}}{g}$$

S vlastnostmi soustavy souvisí vztahem

$$s = \frac{v \cdot (\rho - \rho_o)}{f} = \frac{M \cdot D}{\boldsymbol{R} \cdot T} \cdot \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho}\right)$$

Kulovitá částice, velká ve srovnání s molekulami disperzního prostředí: $f = 6\,\pi\eta_o\,r$; $\upsilon = 4\,\pi r^3/3$

$$u_{sed} = \frac{2}{9}\cdot\frac{(\rho-\rho_o)}{\eta_o}\cdot r^2\cdot g$$

Rychlost sedimentace kulovitých částic je nepřímo úměrná viskozitě prostředí, přímo úměrná rozdílu hustot disperzního podílu a disperzního prostředí a čtverci poloměru částice.

Sedimentační rovnováha

$u_{sed} \approx u_{dif}$

Proti usazování částic působí difuze; která je u hrubých disperzí neměřitelná; u analytických disperzí naopak nedochází k měřitelné sedimentaci. U *koloidních disperzí* mohou být oba pochody vyrovnané a ustaví se sedimentační rovnováha.

Rychlost sedimentace u_{sed}, se rovná rychlosti difuze opačným směrem u_{dif} , koncentrace v dané výšce se nemění s časem. Rychlost difuze - 1.Fickův zákon.

v gravitačním poli	v odstředivém poli
$\frac{\upsilon\cdot g}{f}\cdot(\rho-\rho_o) = -D\cdot\frac{1}{c}\cdot\left(\frac{\partial c}{\partial y}\right)_{T,\,p}$ $\boxed{D = \frac{k_B\cdot T}{f}}$	$\frac{\upsilon\cdot\omega^2\cdot x}{f}\cdot(\rho-\rho_o) = +D\cdot\frac{1}{c}\cdot\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{T,\,p}$ (kladné znaménko: silové pole působí ve směru rostoucí vzdálenosti od osy rotace, x, a koncentrační gradient je kladný, $dc/dx > 0$)
integrací: ***rozložení koncentrací disperzních částic jako funkce výšky***	integrací: ***rozložení koncentrací disperzních částic v závislosti na vzdálenosti od osy rotace***
$\ln c = -\frac{M\cdot g}{\boldsymbol{R}\,T}\cdot(1-\frac{\rho_o}{\rho})\cdot y + \text{konst.}$	$\ln c = \frac{M\cdot\omega^2}{2\,\boldsymbol{R}\,T}\cdot(1-\frac{\rho_o}{\rho})\cdot x^2 + \text{konst.}$

υ - objem sedimentující částice, m (= $\upsilon\cdot\rho$) její hmotnost, M (= $\upsilon\cdot\rho\,N_A$) hmotnost jednoho molu disperzních částic , ρ její hustota, ρ_o hustota disperzního prostředí, f je koeficient tření, $\omega = 2\,\pi\,n$ - úhlová rychlost otáčení, n počet otáček, x - vzdálenost disperzní částice od osy otáčení, y - výška, v níž se nachází částice sedimentující v gravitačním poli

OSMÓZA

tok disperzního prostředí ze zředěnějšího systému do koncentrovanějšího (viz fázové rovnováhy)

Osmotický tlak π - přetlak na straně koncentrovanějšího systému, kterým se zastaví průtok rozpouštědla membránou

Pro ***velmi zředěné ideální roztoky*** ***van't Hoffova rovnice***

$$\pi = \frac{n_2}{V}\cdot\boldsymbol{R}T = c_2\cdot\boldsymbol{R}T = \nu_2\cdot k_B\cdot T = \frac{w_2}{M_2}\cdot\boldsymbol{R}T\,,$$

neideální roztoky: $$\pi = \boldsymbol{R}T\cdot\left(\frac{w_2}{M_2} + B\cdot w_2^2 + C\cdot w_2^3 + \cdots\right)$$

c_2	koncentrace v molech na objemovou jednotku.
$\nu_2 = N_2/V$	počet částic v jednotkovém objemu,
$w_2 = m_2/V$	hmotnost disperzního podílu v jednotce objemu (hmotnostní koncentrace)
m_2	celková hmotnost disperního podílu v objemu V,
M_2	početně střední molární hmotnost (hmotnost jednoho molu disperzních částic),

Dva různě koncentrované roztoky oddělené membránou: $\pi = [(\Sigma c)_{II} - (\Sigma c)_I]\cdot\boldsymbol{R}\,T$

Měření osmotických tlaků - stanovení hmotnosti, popř. poloměru disperzních částic. Osmotický tlak klesá, jestliže se částice slepují nebo tvoří agregáty, naopak vzrůstá při rozpadu agregátů.

Roztoky elektrolytů- v důsledku disociace vzrůstá počet částic: $A_nB_m = n\,A^{m+} + m\,B^{n-}$

$$\Sigma c = \underbrace{c_2\cdot(1-\alpha)}_{A_nB_m} + \underbrace{n\cdot c_2\cdot\alpha}_{A^{m+}} + \underbrace{m\cdot c_2\cdot\alpha}_{B^{n-}} = c_2\cdot[(1+\alpha\,(n+m-1)]$$

MEMBRÁNOVÉ (DONNANOVY) ROVNOVÁHY

$$A_nB_m = n\ A^{m+} + m\ B^{n-}$$

$$c^n_{(+)I} \cdot c^m_{(-)I} = c^n_{(+)II} \cdot c^m_{(-)II}$$

Příklad:

$M_zP = z\ M^+ + P^{z-}$,
$M_2A = 2\ M^+ + A^{2-}$
c_2 mol dm^{-3} M_zP
c_1 mol dm^{-3} M_2A

$$(c^2_{M^+} \cdot c_{A^{2-}})_{Levý} = (c^2_{M^+} \cdot c_{A^{2-}})_{Pravý}$$

Bilance:	na počátku		v rovnováze	
	Levý	**P**ravý	**L**evý	**P**ravý
P^{20-}	c_2	0	c_2	0
M^+	$z\ c_2+2\ c_1$	0	$z\ c_2+2\ c_1-2\ x$	$2x$
A^{2-}	c_1	0	c_1-x	x

MEMBRÁNOVÁ HYDROLÝZA

$$Na^+R^- + H_2O = R^- + H^+ + NaOH$$

	na počátku		v rovnováze	
	L	**P**	**L**	**P**
R^-	***c***		***c***	
Na^+	***c***		$c-x_1$	x_1
OH^-				x_1
H^+			x_1	

Podmínka rovnováhy - pro procházející ionty, tj. Na^+ a OH^-:

$$(a_{Na^+} \cdot a_{OH^-})_L = (a_{Na^+} \cdot a_{OH^-})_P \qquad \text{kde} \qquad (a_{OH^-})_L = K_V/(a_{H^+})_L$$

Membránové separační procesy

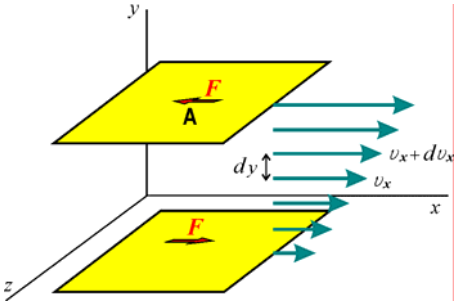
- **dialýza**
- **elektrodialýza**
- **ultrafiltrace**
- **elektroultrafiltrace**

V porovnání s klasickými separačními metodami (krystalizace, extrakce, adsorpce, absorpce, destilace)- membránové procesy často rychlejší, levnější, účinnější

Přednost: dělení probíhá za nízkých teplot. a bez přídavku dalších látek

REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ KOLOIDNÍCH DISPERZÍ

je ovlivňováno
- viskozitou disperzního prostředí
- koncentrací částic
- velikostí částic
- tvarem částic
- interakcemi částice-částice a částice-disperzní prostředí



Tok - relativní pohyb sousedních elementů materiálu.

Tečné napětí mezi dvěma paralelními rovinami tekutiny, které jsou v relativním pohybu - přímo úměrné gradientu rychlosti mezi vrstvami tekutiny:

Newtonův zákon: $\tau_{xy} = -\eta \frac{du_x}{dy}$

τ_{xy} (= F_x/A [N m^{-2}]) tečné napětí působící ve směru osy x v rovině kolmé k ose y

u_x - rychlost toku ve směru osy x , du_x/dy - gradient rychlosti,

η - *dynamická viskozita* - konstanta úměrnosti (rozměr (hmotnost)·(délka)$^{-1}$·(čas)$^{-1}$;
v SI [kg m^{-1} s^{-1} = Pa·s], starší hodnoty v Poisech (1 Poise (označení P) = 0,1 Pa.s)

$\varphi = 1/\eta$ - *fluidita*, reciproká dynamická viskozita, $\nu = \eta/\rho$ *kinematická viskozita*; [m^2 s^{-1}]

Viskozita kapalin s rostoucí teplotou klesá - závislost bývá vyjadřována Andradeovou rovnicí:

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T} \qquad (A, B \text{ jsou konstanty})$$

KAPALINY

NEWTONSKÉ — poměr tečného napětí a rychlostního gradientu

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{(-du_x/dy)} = \text{konst.}$$

konstantní *viskozita*

NENEWTONSKÉ — poměr tečného napětí a rychlostního gradientu

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{(-\mathrm{d}u_x/\mathrm{d}y)} = f(\tau_{xy})$$

funkce tečného napětí nebo rychlostního gradientu *zdánlivá viskozita*

Viskozitní anomálie - zdánlivá viskozita se mění s rychlostním gradientem

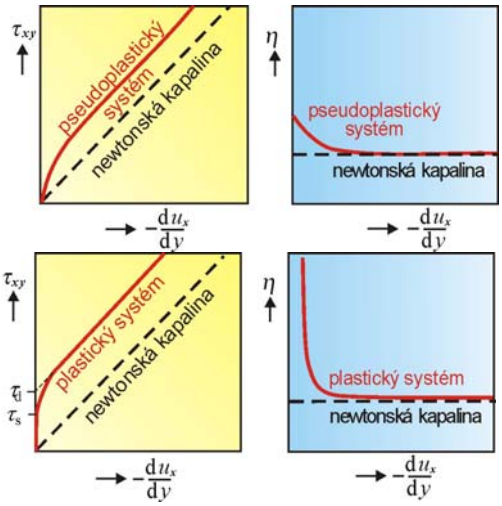
pseudoplasticita

nesouvislé asociační struktury, neustále vznikající a opět zanikající, rozbíjejí se se vzrůstajícím střižným napětím, zmenšuje se počet přechodných asociačních spojů, kinetickými jednotkami jsou menší a jednodušší celky a proto viskozita systému klesá

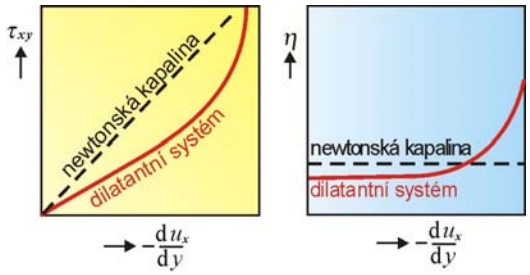
plasticita předpokládá vytvoření úplné struktury s trvalými asociačními spoji, která odolává napětím menším než statická mez toku, ale rozrušuje se při větších napětích, kdy se systém začíná chovat jako kapalina, zpočátku vysoce viskózní, později dobře tekutá (newtonské, anomální i pseudoplastické kapaliny tečou při sebemenším napětí a proto křivka závislosti střižného napětí na rychlostním gradientu prochází počátkem)

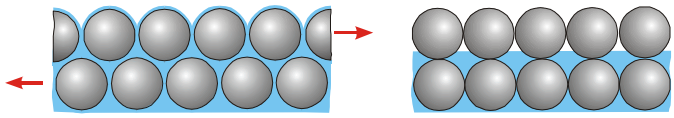
τ_d - Binghamova (dynamická) mez toku - hodnota napětí odečtená jako průsečík přímkové části s osou.

τ_s - statická mez toku



dilatance - při malých napětích gradient rychlosti roste úměrně s napětím (viskozita je konstantní jako u newtonských kapalin); při větších silách náhlý vzrůst viskozity a gradient rychlosti zůstává při dalším zvyšování napětí prakticky konstantní:





Měření viskozity – za konstatní teploty! (obr. viz skripta)

Kapilární viskozimetr, ***Höpplerův (kuličkový) viskozimetr*** – jen pro newtonské kapaliny
Rotační viskozimetr - pro nenewtonské kapaliny

Viskozita disperzních systémů s kapalným disperzním prostředím

Přítomnost částic ($R_{částice} >> R_{molekuly\ disp.prostředí}$) v proudícím disperzním prostředí

- mění dráhy jednotlivých molekul proudící kapaliny
- napomáhá promíchávání jednotlivých vrstev

→ **předčasná turbulence** (přechod laminárního proudění v turbulentní při nižších hodnotách Reynoldsova čísla než v kapalinách, které neobsahují disperzní částice).

- částice zmenšují prostor, zaujímaný v proudu samotnou kapalinou

→ **průměrný gradient rychlosti** ve směru kolmém na směr proudění **roste**

viskozita disperzního systému … je větší než viskozita disperzního prostředí

Einsteinova rovnice pro viskozitu

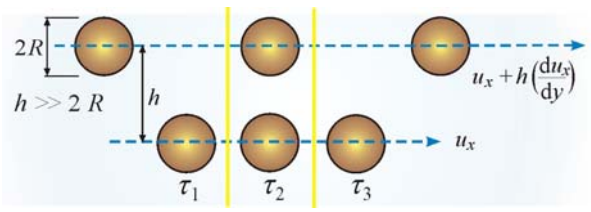
Viskozita ***zředěných*** disperzních systémů, jejichž částice jsou ***tuhé nedeformabilní koule*** bez elektrického náboje, velké ve srovnání s molekulami disperzního prostředí, ale malé ve srovnání s prostorem, v němž k proudění dochází (φ - objemový zlomek disperzního podílu)

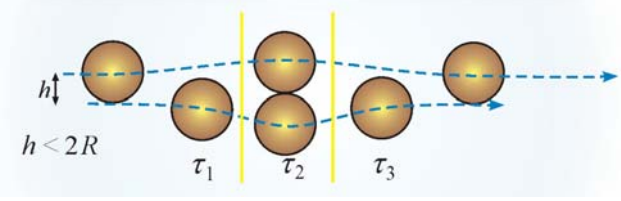
$$\eta = \eta_0 (1 + 2{,}5 \cdot \varphi)$$

<u>*Einsteinova rovnice je striktně platná při nekonečném zředění*</u> - uplatňují se pouze interakce částice–disperzní prostředí (s přijatelnou přesností do objemových zlomků ca 0,01)

Vzájemné ovlivňování částic

Poloha ***dvou*** částic v tokovém poli v různých časových okamžicích





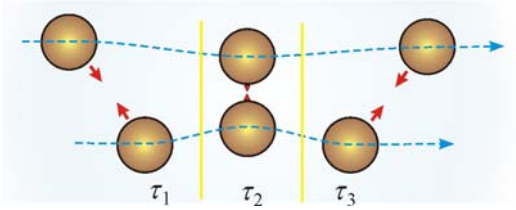
Na dvou vzdálených hladinách($h >> 2\,R$) Na dvou blízkých hladinách ($h << 2R$)

změna trajektorie ⇒ spotřeba energie ⇒ zvýšení viskozity

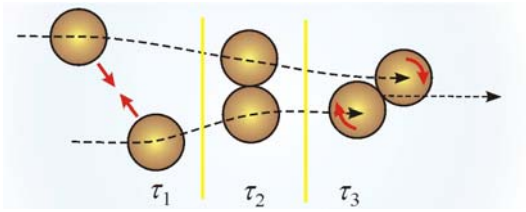
Pravděpodobnost těsného přiblížení dvou částic ~ φ^2.
Vyšší koncentrace částic - vliv tří nebo více sousedních částic ⇒ Einsteinova rovnice je pouze prvním členem rozvoje

$$\eta_i = 2{,}5 \cdot \varphi + k_2 \cdot \varphi^2 + k_3 \cdot \varphi^3 + \cdots$$

Vliv přitažlivých sil mezi částicemi - deformace dráhy, brždění a vzrůst viskozity (efekt vzrůstá s rostoucí velikostí sil mezi částicemi).



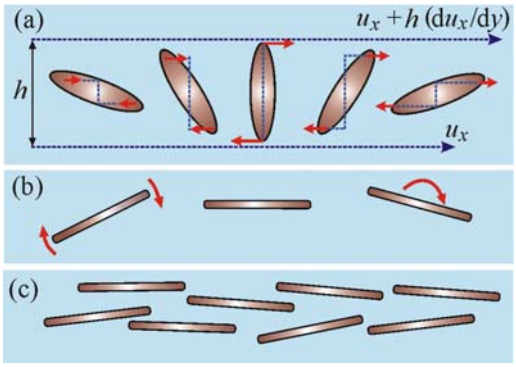
Mírné přitažlivé síly,
které způsobí deformaci trajektorií



Silné přitažlivé síly, které vedou k vytváření
rotujících dubletů (Brownův pohyb je zanedbán)

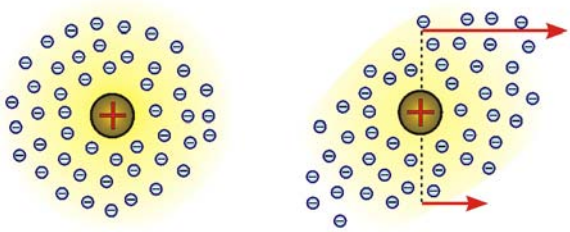
Vliv tvaru částic

Anizometrické částice - rotační pohyb při toku mnohem intenzivnější než u částic izometrických - další energie a vzrůst viskozity.
Největší otáčivý moment a úhlová rychlost při orientaci částice kolmo ke směru toku, nejmenší při paralelní orientaci
Silně anizometrické částice (c) - rotace spočívá v příležitostných obratech o 180° , má malý vliv na viskozitu. Proudící kapalina není opticky izotropní - *dvojlom za toku*.

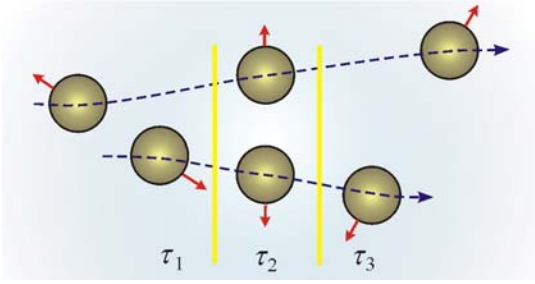


Vliv náboje částic na viskozitu

Primární elektroviskozitní efekt - deformace sférické elektrické dvojvrstvy smykovým polem. Na stavbu dvojvrstvy před částicí a její rozpad za částicí je zapotřebí určitého času - vzrůstá viskozita,



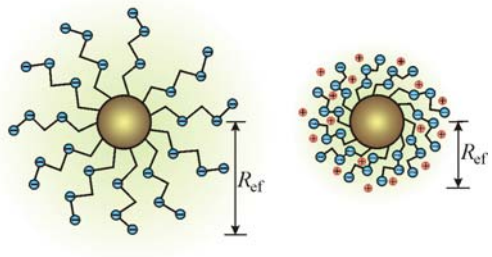
Sekundární elektroviskozitní efekt



odpuzování mezi dvojvrstvami zvětšuje efektivní kolizní průměr částic a tedy také jejich efektivní objem, což také vede k deformaci trajektorií částic zvýšení viskozity.

Terciární elektroviskozitní efekt

Přítomnost adsorbovaných vrstev na částici zvětšuje efektivní průměr.

Pro polyelektrolyty, závisí jejich efektivní tloušťka vrstvy na koncentraci soli i na pH.

Změny ve složení roztoku, které vedou ke kompaktnější adsorbované vrstvě snižují viskozitu a naopak.