

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY A
MEZIOBOROVÝCH STUDIÍ

Studijní program: Nanotechnologie
Studijní obor: Nanomateriály

**INKORPORACE NANOČÁSTIC DO
NANOVLÁKEN A STUDIUM JEJICH
MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ**

**THE INCORPORATION OF NANOPARTICLES
INTO NANOFIBERS AND STUDY OF THEIR
PROPERTIES**

Autor: Julie Soukupová

Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš

Počet stran: 47

Zadání

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala všem, kteří mi pomáhali při vypracování této práce. Především bych chtěla poděkovat vedoucímu práce Ing. Petru Mikešovi.

Anotace

Teoretická část práce se zabývá popisem nanočástic a jejich chováním v disperzním systému. Disperzním systémem je polymerní, nebo olejová disperze feromagnetických nanočástic, nebo feromagnetická kapalina. Hlavním předmětem práce je destabilizace kapalin ve vnějším silovém poli. Pole použité k destabilizaci volné hladiny je elektrostatické, nebo magnetostatické.

Praktická část se zabývá pozorováním a popisem destabilizace polymerních disperzí nanoželeza, olejových disperzí nanoželeza a feromagnetických kapalin.

Klíčová slova:

- Nanočástice,
- Feromagnetické kapaliny,
- Elektrostatika,
- Magnetostatika,
- Destabilizace volné hladiny,
- Permanentní magnet.

Annotation

The theoretical part of this thesis deals with description of nanoparticles and their behavior in the dispersion system. Dispersion system is polymer-, or oily dispersion ferromagnetic nanoparticles, or Ferro fluid. The main subject is destabilization of free surface in external force field. The external force field is used electrostatic field, or magneto statics field.

The practical part of this thesis deals observation and behavior polymer dispersion and oily dispersion with Nano iron, or Ferro fluid.

Key words:

- Nanoparticle,
- Ferro fluid,
- Electrostatics,
- Magneto statics,
- Destabilization free surface fluid,
- Permanent magnet.

Obsah

Úvod.....	11
1. Nanočástice.....	12
1.1. Metody přípravy nanočástic.....	12
1.1.1. Chemické metody přípravy nanočástic.....	12
1.1.2. Fyzikální metody přípravy nanočástic.....	14
1.2. Vlastnosti nanočástic.....	15
2. Disperzní systém.....	17
2.1. Feromagnetické kapaliny.....	18
3. Destabilizace volné hladiny kapalin vnějším silovým polem.....	21
3.1. Elektrostatika.....	21
3.1.1. Coulombův zákon a Gausova věta z elektrostatiky.....	21
3.1.2. Elektrostatický potenciál.....	22
3.1.3. Elektrický tlak.....	23
3.2. Magnetostatika.....	24
3.2.1. Stacionární magnetické pole.....	24
3.2.2. Magnetické vlastnosti látek.....	26
3.3. Mechanika kapalin.....	28
3.3.1. Rovnice kontinuity pro ideální kapaliny.....	28
3.3.2. Eulerova rovnice pro ideální kapaliny.....	28
3.3.3. Navierova-Stokesova rovnice.....	30
3.4. Elektrostatické zvlákňování.....	33
3.5. Základní princip elektrostatického zvlákňování.....	33
3.5.1. Princip samoorganizace při procesu hladinového elektrostatického zvlákňování.....	34
3.6. Destabilizace volné hladiny kapaliny magnetickým polem.....	35
3.7. Využití feromagnetických kapalin při elektrostatickém zvlákňování.....	37
4. Permanentní magnety.....	39
4.1. Neodymové magnety.....	39
4.1.1. Sílové účinky působící mezi cylindrickými magnety v závislosti na změně vzdálenosti mezi magnety.....	40
5. Vliv magnetického pole na feromagnetickou disperzi.....	43
5.1. Návrh upnutí magnetů.....	43
5.2. Magnetické pole.....	43
5.3. Použité disperze.....	46

5.3.1.	Chování polymerních disperzí v magnetickém poli	47
5.4.	Chování olejových disperzí v magnetickém poli	50
5.4.1.	Pozorování volné hladiny disperze	50
5.4.2.	Pozorování olejových disperze v uzavřené nádobě	53
5.5.	Chování feromagnetických kapalin v magnetickém poli	54
6.	Měření magnetického pole.....	56
7.	Závěr	59

•

Seznam použitých symbolů a zkratk

OD	Nularozměrné objekty	-
nZVI	Nanoželezo	-
PU	Polyuretan	-
PVB	Polyvynylbutyral	-
γ	Povrchové napětí	[$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
δ_{ik}	Kronekerova delta	
ε_0	Permitivita vakua	[$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
ε	Relativní permitivita	[$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
η	Dynamická viskozita	[$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$]
η'	Kinetická viskozita	[$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
μ_0	Permeabilita vakua	[$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
μ_r	Relativní permeabilita	[$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
ξ	Růstový faktor amplitudy	
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	Hustota kapaliny	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ρ_n	Hustota náboje	[$\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ	Plošná hustota náboje	[$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$]
σ_m	Maxwellovo napětí	[N]
σ_{mc}	Kritická hodnota Maxwellova napětí	[N]
φ	Elektrostatický potenciál	[V]
χ_m	Magnetická susceptibilita	[-]
ω	Kruhová frekvence	
ω_c	Kritická kruhová frekvence	
ω_v	Úhlová rychlost	[$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
A	Amplituda	
a	zrychlení	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
a_k	Kapilární délka	[m]
B	Magnetická indukce	[T]
d	Vzdálenost mezi deskami	[m]
E	Intenzita elektrického pole	[$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]

E_c	Kritická intenzita elektrického pole	[kV]
F	síla	[N]
F_1	Síla mezi náboji	[N]
F_2	Síla mezi náboji	[N]
F_l	Lorenzova síla	[N]
F_m	Magnetická síla	[N]
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
H	Intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
h	Vzdálenost kolektoru	[cm]
j	Proudová hustota	[A·m ⁻²]
k	Vlnový vektor	[-]
K_d	Konstanta magnetostatické energie	[J·m ⁻³]
l	Vyosení	[m]
M	Magnetizace	[A·m ⁻¹]
m	Hmotnost	[Kg]
P	Polarizace	[T]
p	Tlak	[Pa]
p_e	Elektrický tlak	[Pa]
Q	Hmotnostní tok	[kg·s ⁻¹]
q	Náboj	[C]
r	Vzdálenost mezi náboji	[m]
r_k	Poloměr kapiláry	[cm]
R	Poloměr magnetu	[m]
S	Plocha	[m ²]
S_{xy}	Tenzor smykového napětí	
t	Čas	[s]
t_m	Výška magnetu	[m]
V	Objem	[m ⁻³]
V_c	Kritické napětí	[kV]
x	Vzdálenost mezi magnety	[M]

Úvod

Jednou z metod přípravy nanovláken je elektrostatické zvláknování. Elektrostatické zvláknování je metoda, kde je k výrobě nanovláken z polymerního roztoku použito silné elektrostatické pole. Působení elektrostatického pole na polymerní roztok dochází k destabilizaci volné hladiny kapaliny. Následkem destabilizace volné hladiny vznikají kapalinové trysky, ze kterých jsou formována nanovlákná. Toto chování je popsáno vztahy známými z elektrohydrodynamiky, která k popisu chování kapalin v elektrickém poli využívá spojení elektrostatiky a mechaniky kapalin.

[1]

Nanokompozitní vlákna obsahující nanočástice jsou připravována z disperzí konkrétních nanočástic v polymerním roztoku, tento přístup však umožňuje pouze inkorporaci omezeného množství nanočástic do nanovláken. V případě disperzí nanočástic s magnetickými vlastnostmi, popřípadě magnetických kapalin, které budou vystaveny silnému magnetickému poli, pravděpodobně dojde také k destabilizaci volné hladiny kapaliny. K popisu tohoto chování je používána magnetohydrodynamika, která obdobně jako elektrohydrodynamika popisuje vliv působení vnějšího silového pole na kapalinu, v případě magnetohydrodynamiky je vnějším silovým polem pole magnetické.

[1] [2] [3] [4]

Předpoklad takového chování magnetické disperze, nebo magnetické kapaliny vychází z fyzikálního popisu magnetostatiky, který je velmi podobný elektrostatice. Vyvolání nestability magnetické disperze, nebo kapaliny, které je cílem práce, může vést k podpoření zvláknování některých polymerních roztoků, ke zvláknění disperzí obsahujících vyšší podíl nanočástic, k ovlivnění rozložení nanočástic ve vláknech. Takové materiály pak mohou nalézt uplatnění v oblastech, ve kterých už nyní jsou používány magnetické částice a feromagnetické kapaliny, mohou být použity pro cílenou dodávku léčiv. Další uplatnění může být na základě jiných vlastností materiálu, než jsou vlastnosti magnetické, těmito vlastnostmi může být například schopnost rozkládání kontaminantů, kterou mají částice nZVI, v takovém případě by magnetických vlastností částic mohlo být využito při výrobě vláken s vyšší koncentrací nZVI.

1. Nanočástice

Nanočástice jsou definovány na základě svých rozměrů. Pojem nanočástice zahrnuje především částice o velikosti 1-100 nm. Konkrétně rozměrů nanočástic menších než 10-20 nm dochází k největším změnám vlastností od objemového materiálu. Částice o rozměrech 100 nm-1 μ m jsou označovány za submikronové částice. Pojem částice označuje 0D objekty.

[5]

1.1. Metody přípravy nanočástic

Pro výrobu nanočástic jsou známy dva hlavní přístupy „Top-down“ a „Bottom-up“. Za fyzikální přístup označujeme „Top-down“ vycházející ze zmenšování objemového materiálu. „Bottom-up“ označujeme jako chemický přístup, jedná se o vytváření větších struktur z atomárních popřípadě molekulárních prekurzorů. Dále budou popsány metody přípravy nanočástic.

[5]

1.1.1. Chemické metody přípravy nanočástic

V současnosti paří chemické metody k hlavním způsobům přípravy nanočástic. Zde budou uvedeny některé z těchto metod.

Syntéza z kapalné fáze je určena pro výrobu kovových nanočástic. Syntéza nanočástic z kapalné fáze využívá roztoků obsahujících molekuly kovů, jako jsou jejich soli nebo také organokovové materiály. Chemickou redukcí kovů v roztoku za přítomnosti povrchově aktivních látek dochází k tvorbě kovových klastrů.

[6]

Metoda Sol-gel je mokrým procesem přípravy nanočástic. Reakční roztok obsahuje prekurzory i stabilizátory, které upravují průběh chemické reakce. Pro stabilizaci nanočástic se využívá několik principů, první je elektrostatická stabilizace, která využívá odpuzivých sil mezi stejně nabitými částicemi ke stabilizaci koloidních roztoků. Při sférické stabilizaci dochází k fyzikální nebo chemické adsorpci organických molekul, přes vrstvu adsorbovaných molekul nemohou dále pronikat molekuly a růst částice se zastaví. Smíšená sféricko-elektrická stabilizace koloidních roztoků využívá sférické stabilizace částic a koloidního surfaktantu. Na velikosti a znaménku nesených nábojů závisí účinky stabilizace. Velikost a tvar připravovaných nanočástic ovlivňuje celá řada parametrů jako koncentrace prekurzorů, stabilizátorů a pomocných látek roztoku, teplota, tlak a pH roztoku. Metodou sol-gel dochází ke vzniku nanočástic s širším rozdělením velikostí, než u metod syntézy z plynné fáze.

[7]

Syntéza z plynné fáze umožňuje přípravu nanočástic širokého rozsahu. Metody syntézy z plynné fáze byly vyvinuty tak, že je využito více principů, jako je vypařování, kondenzace, nebo tepelný rozklad. Změnou podmínek, především teploty a tlaku dochází při syntéze nanočástic z plynné fáze ke změně mechanismů nukleace a růstu nanočástic. Metodami vypařování inertních plynů dochází ke vzniku nanočástic s vysoce čistými povrchy. Tvorba nanočástic z plynné fáze může být realizována celou řadou procesů, kterými je syntéza nebo spalování v plamenu, syntéza v plazmě, elektrickém oblouku, pyrolýzou nebo chemickou kondenzací z plynné fáze, ozáření laserovým, UV nebo rentgenovým zářením a dalšími způsoby.

[7] [8] [9]

Příkladem syntézy z plynné fáze je *tepelný rozklad (pyrolýza)*. Tepelný rozklad je další metodou určenou pro přípravu nanočástic kovů a oxidů kovů. K tvorbě nanočástic dochází při tepelném rozkladu pevných látek, kterými jsou anorganické a organické sloučeniny kovů. Podle obsahu kyslíku v reakčním prostoru dělíme tepelné rozklady na oxidativní a redukční. Redukčním tepelným rozkladem je například syntéza čistého železa z ferrihydritu ($\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$), redukce probíhá ve vodíkové atmosféře při teplotě 600°C podle rovnice $2\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9 + 15\text{H}_2 \rightarrow 10\text{Fe} + 24\text{H}_2\text{O}$.

Příkladem oxidativního tepelného rozkladu je příprava nanočástic γ -Fe₂O₃. K syntéze těchto částic dochází tepelným rozkladem octanu železitého (CH₃COO)₂Fe při teplotě 400°C, který probíhá podle rovnice (CH₃COO)₂Fe+O₂→ Fe₂O₃+3H₂O+2CO₂.

[8]

1.1.2. Fyzikální metody přípravy nanočástic

Vedle chemických metod syntézy nanočástic existují fyzikální metody přípravy nanočástic, které využívají rozbíjení objemových (makroskopických) materiálů se stejným chemickým složením. Rozdělení velikostí nanočástic vyrobených fyzikálními metodami je široké, jejich vnitřní struktura je spíše amorfni.

[8] [7]

Vysokoenergetické mletí využívá mechanického rozrušování objemového materiálu (kov, polymer, keramika) pomocí rotujících bubnů, nebo kuliček z tvrdé oceli nebo karbidu wolframu. Ke zmenšení rozměrů zrn vedou opakované deformace materiálu. Z důvodu zabránění nežádoucím chemickým reakcím, jako je oxidace, je mletí prováděno v inertní atmosféře. Mletí umožňuje výrobu nanočástic o velikosti pod 10 nm v průmyslovém množství. [5]

Kriokondenzace v inertním plynu různými způsoby kondenzace atomizovaných částic dochází v aparatuře v okolí podchlazeného prstu ke vzniku nanočástic, které jsou pomocí proudění inertního plynu dopraveny k odběrnému místu.

[7]

Dalšími fyzikálními metodami syntézy nanočástic jsou laserová ablace, odpařování, elektro, nebo plazmatické rozprašování nebo exploze.

[7]

1.2. Vlastnosti nanočástic

Některé z vlastností nanočástic se podstatně liší od vlastností objemového materiálu. Dokonce i fyzikální vlastnosti (například bod tání), které byly považovány za specifické, mohou být změněny, pokud se rozměry částic pohybují v oblasti nanometrů. Změna hlavních vlastností související s rozměry v oblasti nanometrů se nazývá „size effect“. Vlivem tohoto efektu může docházet ke změnám charakteru i chování částic i prášků s nanorozměry. „Size effect“ je dominantní především u následujících vlastností, kterými jsou morfologické a strukturní, tepelné, elektromagnetické, optické a mechanické vlastnosti.

[10]

Hlavní morfologickou a strukturní vlastností je velký specifický povrch, který ovlivňuje především reaktivitu nanočástic, u nanočástic z oxidů kovů ovlivňuje velký specifický povrch jejich oxidaci. Specifický povrch nanočástic úzce souvisí s poměrem atomů uvnitř a na povrchu částice. V některých případech se u nanočástic se změnou velikosti může měnit jejich krystalická struktura.

[10]

Tepelné vlastnosti, jako je například bod tání, který je výrazně nižší u nanočástic než u objemového materiálu. Například bod tání zlata (1336 K) prudce klesá, pokud je velikost částic pod 15 nm, pokles na 200 K může být zaznamenán u částic o velikosti 6 nm.

[10]

S klesající velikostí nanočástic se liší také vlastnosti mechanické. U objemových kovových i keramických materiálů závisí pevnost materiálu na velikosti zrn. Toto platí i pro kompozitní materiály, pevnost částicového kompozitu závisí na velikosti obsažených nanočástic.

[10]

Objem nanočástic se pohybuje v oblasti podobné rozměru molekul. Magnetismus se neobjevuje pouze u nanočástic, ale také dochází k interakci mezi magnetickými momenty molekul. Magnetismus a magnetické vlastnosti některých materiálů budou uvedeny v následujících kapitolách.

[10]

Dalšími obecnými vlastnostmi nanočástic jsou agregace a sedimentace. Na základě přitažlivých interakcí mezi částicemi dochází k jejich agregaci. Agregáty nanočástic pak rychleji sedimentují. Rychlost sedimentace je dána Stokesovým vztahem.

$$v = \frac{1}{18} \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot d^2}{\eta}, \quad (1)$$

kde v je rychlost sedimentace, ρ_2 je hustota částice, ρ_1 je hustota disperzního prostředí, g je gravitační zrychlení, d je průměr částic, η je dynamická viskozita kapaliny.

[11]

2. Disperzní systém

Disperzní systém neboli disperze je tvořena dvěma složkami. První složkou je disperzní podíl, kterým jsou částice rozptýlené v druhé složce, která se nazývá disperzní prostředí. Disperzní podíl je většinou v jiné fázi a má odlišné chemické složení od disperzního prostředí. Většina disperzí je více složkovými systémy. O heterogenní vícetložkové systémy se jedná v případě, že se disperzní podíl liší od disperzního prostředí svým chemickým složením a fází. Homogenní vícetložkové systémy představují všechny druhy roztoků. Ve výjimečných případech může být disperzní systém jednosložkový. Charakter disperze je dán koncentrací disperzního podílu, velikostí částic, tvarem částic, vzájemnými interakcemi mezi částicemi, interakcemi mezi disperzním podílem a disperzním prostředím.

[12] [13]

Velikost a tvar disperzních částic

Stupeň disperzity charakterizuje rozptýlení disperzního podílu v disperzním prostředí, je dán rozměrem disperzních částic. Podle stupně disperzity jsou disperze rozděleny na hrubé disperze, kterými jsou suspenze, emulze, dým. Další skupinou jsou koloidní disperze. Do této skupiny řadíme např.: micelární koloidní roztoky, roztoky makromolekulárních sloučenin. Právě roztoky nízko molekulárních látek patří do skupiny analytické disperze. Velikost disperzních částic se pohybuje v oblasti od 1 nm až do 1 μm .

[13]

Pokud jsou částice charakterizovány jedním rozměrem (OD částice) jsou tyto částice izometrické. Anizometrické částice charakterizované dvěma rozměry (zploštělé disky, destičky), pokud jeden rozměr výrazně převyšuje druhý (vlákna, trubičky). Velikost a tvar částic ovlivňuje viskozitu, sedimentaci, rozptyl světla.

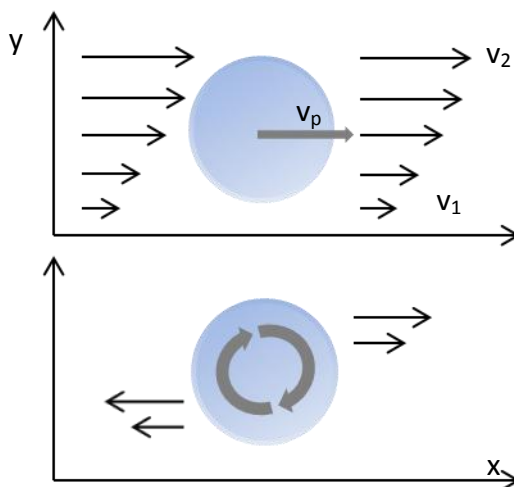
[13]

Viskozita disperzních soustav

K zvýšení viskozity vlivem disperzního podílu dochází u hrubých a koloidních disperzí. Velikost disperzních částic hrubých a koloidních disperzí je několika násobně větší než velikost molekul disperzního prostředí, proto lze disperzní prostředí považovat za spojitě. Z klasického hydrodynamického přístupu pak vyplývá. Je-li disperzní částice unášena

tekoucím disperzním prostředím, pak se unášená částice nachází v rychlostním gradientu. Částice se v tekoucí kapalině pohybuje střední rychlostí v_p , pro kterou platí $v_1 < v_p < v_2$. Relativní rychlost částice $v - v_p$ má v různých vrstvách kapaliny různé znaménko, proto je částice uvedena do rotačního pohybu, úhlová rychlost ω je rovna polovině gradientu rychlosti. Spolu s disperzní částicí vykonává translační pohyb o rychlosti v_p a rotační pohyb s úhlovou rychlostí ω , také vrstva kapaliny těsně přiléhající na povrch částice. Ale vrstva kapaliny, která je v dostatečné vzdálenosti od povrchu částice, se pohybuje translačně a její rychlost není částicí ovlivněna. Důsledkem tohoto efektu se disperzní systém jeví viskóznější. Situace je naznačena na obrázku č.1.

[13]



Obrázek 1 Disperzní částice unášená polymerní kapalinou [11]

2.1. Feromagnetické kapaliny

Magnetoreologické kapaliny jsou koloidní kapaliny, ve kterých se velikost částic pohybuje v oblasti mikrometrů. Tyto kapaliny se vyznačují multidipólovou interakcí částic. Pokud nejsou částice, polarizovány, nemají magnetický moment. Díky vyšší velikost částic jsou magnetoreologické kapaliny nestabilní a rychle dochází k agregaci částic, pevné částice obsahují až 70% hmotnostních. Magnetoreologické kapaliny se vlivem silného magnetického pole stávají viskóznějšími, dokonce dochází k tuhnutí.

[4]

Feromagnetická kapalina je většinou disperzní systém feromagnetických nanočástic a nosné kapaliny. Nanočástice s feromagnetickými vlastnostmi jsou například Fe_3O_4 . Velikost nanočástic v kapalině se pohybuje od 3 do 15 nm. Nosnou kapalinou je voda, olej, nebo organické rozpouštědlo. Mechanické a chemické vlastnosti feromagnetické kapaliny určuje nosná kapalina, magnetické vlastnosti dávají feromagnetické kapalině nanočástice. Bez přítomnosti magnetického pole se nanočástice v nosné kapalině pohybují náhodným Brownovým pohybem a mají pro nanočástice přirozenou vlastnost agregovat. Potažení částic surfaktantem zabraňuje jejich agregaci, zajišťuje homogenní magnetické vlastnosti kapaliny a koloidní stabilitu. Ve feromagnetické kapalině je objemové zastoupení jejich složek následující 5% magnetických částic, 10% detergentu, 85% nosné kapaliny.

[4]

Každá nanočástice v magnetické kapalině tvoří Weissovu doménu, což je spontánně zmagnetovaná oblast ve feromagnetiku. Weissovy domény mají různou magnetizaci a uspořádávají se vlivem magnetického pole. Každá magnetická nanočástice má magnetický moment, proto se chová jako miniaturní permanentní magnet. Mimo magnetické pole jsou magnetické momenty částic náhodně orientované a kapalina se jeví jako nemagnetická.

Při působení magnetického pole na feromagnetickou kapalinu dochází k polarizaci nanočástic v kapalině. Polarizované částice se budou stáčet do směru magnetického pole. Magnetické pole, tak přes magnetické částice působí na celou kapalinu a způsobuje její pohyb ve směru intenzity magnetického pole.

[4]

Závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H má u feromagnetických kapalin obdobný průběh jako u feromagnetik. S rostoucí teplotou klesá hodnota magnetické susceptibility až je při Curieově teplotě hodnota magnetické susceptibility nulová, to znamená, že magnetická kapalina při překročení kritické Curieovy teploty ztrácí magnetické vlastnosti. Se změnou teploty se mění také viskozita kapaliny. Změnou viskozity je ovlivněna viskozita nosné kapaliny, viskozita klesá s růstem teploty přibližně exponenciálně. Viskozita feromagnetické kapaliny je ovlivňována také v závislosti na změně magnetického pole, díky které dochází k magnetoviskóznímu efektu, díky surfaktantu, který zabraňuje působení Van der Walsových interakcí mezi jednotlivými částicemi, však zůstává magnetická kapalina tekutá i v silném magnetickém poli.[4]

Feromagnetické kapaliny se mohou lišit druhem použitých částic, nebo druhem nosné kapaliny. Dále jsou uvedeny některé feromagnetické kapaliny rozdělené podle druhu nosné kapaliny.

[4]

Vodné feromagnetické kapaliny

Magnetické kapaliny, kde je jako nosná kapalina použita voda, mají uplatnění jako kontrastní látky při magnetické rezonanci.

[14]

Dextranové feromagnetické kapaliny

Pro použití v biologických aplikacích jsou nutné biokompatibilní magnetické kapaliny, z tohoto důvodu je jako nosná kapalina používán dextran.

[15]

3. Destabilizace volné hladiny kapalin vnějším silovým polem

Na volném povrchu hladiny kapalin se vyskytuje kapilární vlna, proměnná v čase, vznikající působením gravitačního pole. Působením vnějšího silového pole dochází při překročení kritických hodnot intenzity vnějšího pole ke ztrátě časové závislosti kapilárního vlnění a hladina je destabilizována.

[16]

3.1. Elektrostatika

Elektrostatika se zabývá časově neměnným elektrickým polem vyvolaným elektrickými náboji, náboje jsou uvažované v pracovní soustavě v klidu. Existují dva druhy elektrického náboje, jeden je označován jako kladný, druhý jako záporný. Interakce těchto nábojů je popsána Coulombovým zákonem.

[17] [18]

3.1.1. Coulombův zákon a Gausova věta z elektrostatiky

Základním zákonem elektrostatiky je Coulombův zákon, který určuje sílu mezi dvěma nepohybujícími se náboji. Tato síla je přímo úměrná součinu nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti mezi náboji. Směr síly je určen přímkou spojující náboje.

$$\vec{F}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|r|} = -\vec{F}_2, \quad (2)$$

kde F_1 je síla působící na náboj q_1 , r je vzdálenost mezi náboji q_1 a q_2 , ϵ_0 je permitivita vakua. Síla F_2 , která působí na náboj q_2 , má stejnou velikost, jako síla F_1 , ale působí opačným směrem. První zlomek rovnice, $1/4\pi\epsilon_0$, je konstanta úměrnosti.

[19]

Dalším přírodním zákonem je princip superpozice, tím doplňujeme princip superpozice v případě, že jde o víc než dva náboje. Princip superpozice zní: Síla působící na jakýkoliv náboj je vektorovým součtem Coulombových sil pocházejících od všech ostatních nábojů.

[19]

Ekvivalentní k Coulombovu zákonu (2) je Gausova věta z elektrostatiky: Skalární součin intenzity elektrického pole a malého elementu plochy ds , integrovaný přes celou plochu uzavřenou plochu S , je roven podílu náboje q , uzavřeného uvnitř plochy a prmitivity ε .

$$\oint_S \vec{E} ds = \frac{q}{\varepsilon}, \quad (3)$$

nebo můžeme Gausův zákon zapsat v diferenciálním tvaru

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_n}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

kde ρ_n je hustota náboje. Diferenciální tvar rovnice je jednou ze základních rovnic elektrostatiky.

[19] [1]

3.1.2. Elektrostatický potenciál

Elektrostatický potenciál φ je jednou z veličin, která slouží k popisu elektrostatického pole. Tato veličina se zavádí v případě konzervativního elektrostatického pole. To znamená, že při pohybu náboje po uzavřené křivce nedochází k uvolňování elektrostatické energie. Pole elektrostatické je polem konzervativním.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi \quad (5)$$

Zavedení potenciálu vychází z druhé Maxwellovy rovnice elektrostatiky, která říká, že rotace intenzity elektrostatického pole je rovna nule

[20]

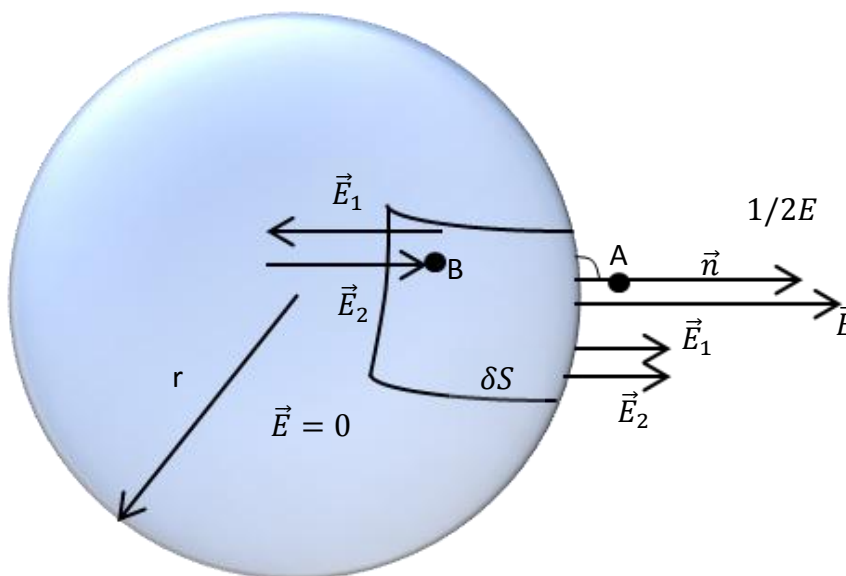
$$\vec{\nabla} \times E=0 \quad (6)$$

3.1.3. Elektrický tlak

Elektrický tlak je základním parametrem elektrostatického zvlákňování, jelikož způsobuje rozpad vodivých kapalinových těles. Při odvození elektrického tlaku se vychází z malého plošného elementu δS nabitě kapalinové kapky. Celková intenzita elektrostatického pole E má dva příspěvky E_1 a E_2 , díky principu superpozice tedy platí $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Intenzita uvnitř vodivé kapky je dána vztahem $\vec{E} = \vec{E}_1 - \vec{E}_2 = 0$. Pro intenzitu vně nabitě kapky, pak platí:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 = \frac{1}{2}\vec{E} \quad (7)$$

Tato situace je uvedena na obrázku č. 2.



Obrázek 2 intenzita elektrického pole na nabitě sférické kapce

Podle Gausovy věty z elektrostatiky aplikované na plošný element δS , plošnou hustotou náboje σ platí vztah.

$$E\delta S = \frac{\sigma\delta S}{\varepsilon} \quad (8)$$

Elektrický tlak je definován jako podíl síly, která je dána nábojem $q = \sigma\delta S$ působícím na plošný element δS , a plošného elementu δS .

$$p_e = \frac{\delta F}{\delta S} \quad (9)$$

Po dosazení vyplývá z rovnic (7), (8), (9) vztah pro elektrický tlak:

$$p_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \quad (10)$$

[20] [1]

3.2. Magnetostatika

Magnetostatika je oblast fyziky popisující magnetické pole stacionárních proudů. Vztahy uplatňované v magnetostatice jsou do značné míry analogické se vztahy platícími v elektrostatice. Magnetická pole se objevují při pohybu náboje, tedy v přítomnosti proudů. Na rozdíl od elektrostatiky nemůže být magnetické pole izolováno, existují pouze jen magnetické dipóly. Magnetickým dipólem je označována proudová smyčka, která se vytváří kolem atomů i těles a má dva póly severní (N) a jižní (S)

[19] [21] [22]

3.2.1. Stacionární magnetické pole

Silové působení mezi zmagnetizovanými látkami bylo pozorováno již ve středověku. Jako látky vykazující tyto vlastnosti byly známy některé nerosty obsahující především oxidy železa (magnetit Fe_3O_4 , maghemit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ apod.) a železo.

[21]

Magnetické pole může být v dané části vytvořeno náboji libovolného typu, které se pohybují v makroskopickém měřítku, nebo přítomností látek ve zmagnetizovaném tvaru. Na elektrický náboj působí síla, která je závislá na jeho poloze a na rychlosti jeho pohybu. Pomocí dvou vektorových veličin určujících sílu působící na náboj je pak charakterizován každý bod v prostoru. Složka určující silovou složku nezávislou na pohybu náboje je elektrická síla. Druhá silová složka je závislá na rychlosti náboje, a je nazývána jako

magnetická síla, která má směrový charakter. Směr i velikost této magnetické síly závisí v každém bodě na směru pohybu částice.

[19] [21]

Magnetická indukce B je veličina charakterizující magnetické pole. Vektor indukce magnetického pole B určuje směr v prostoru i konstantu úměrnosti. Pomocí vektoru magnetické indukce je magnetická síla vyjádřena vztahem

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (11)$$

[19] [21]

Celková elektromagnetická síla, která je nazývána Lorentzovou silou, je dána vztahem

$$\vec{F}_l = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (12)$$

[19] [21]

Magnetická indukce je dána jako newton.(amper.metr)⁻¹, která se označuje tesla.

Magnetostatika je obdobně jako elektrostatika popsána dvěma Maxwellovými rovnicemi. První rovnice magnetostatiky v diferenciálním tvaru

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (13)$$

vyjadřuje experimentální poznatek, že v přírodě neexistují „magnetické náboje“ tvořící zdroje magnetického pole. Proto křivky umožňující zobrazení magnetického pole jsou vždy uzavřené, jedná se o magnetické indukční čáry. Druhá rovnice magnetostatiky, neboli Ampérův zákon, je dána vztahem

$$\nabla \times H = j, \quad (14)$$

kde H je intenzita magnetického pole, j je proudová hustota. Magnetostatika je pouze aproximací, neboť pro vznik magnetického pole jsou nutné proudy vznikající při pohybu nábojů. Jedná se o speciální druh dynamické situace, kdy dochází k pohybu velkého počtu nábojů. Pohybu nábojů je přiblížen ustáleným tokem náboje, proto je zavedena proudová hustota j neměnicí se v čase. Pro proudovou hustotu j platí vztah $\nabla \cdot j = 0$, to znamená, že pro teorii magnetostatiky jsou uvažovány pouze náboje pohybující se po uzavřených drahách.

[19] [21]

3.2.2. Magnetické vlastnosti látek

Magnetické veličiny, které jsou závislé na magnetických vlastnostech látky, a vztahy mezi nimi umožňují přesný popis magnetického pole. Pro popis stacionárního pole vyhovují lineární materiálové vztahy.

[21]

Pro popis magnetických vlastností je hlavní vztah mezi magnetizací, nebo magnetickou polarizací a vnitřním magnetickým polem, tedy vnitřní intenzitou magnetického pole. Látky lze podle chování v magnetickém poli rozdělit do dvou skupin. Látky, jejichž magnetizace dosahuje nízkých hodnot, řadíme do skupiny slabě magnetických. Naopak látky, u kterých magnetizace nabývá vysokých hodnot, řadíme do skupiny silně magnetických. Magnetizace M je dána vztahem:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}, \quad (15)$$

kde χ_m je magnetická susceptibilita látky, H je intenzita magnetického pole. Magnetická polarizace P je dána vztahem:

$$\vec{P} = \mu_0 \chi_m \vec{H}, \quad (16)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua. Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou pole je vyjádřen

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{P} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (17)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua v jednotkách henry·metr⁻¹, μ_r je relativní magnetická permeabilita, pro kterou platí $\mu_r = 1 + \chi_m$. Magnetická susceptibilita χ_m a relativní magnetická permeabilita jsou bezrozměrné veličiny. Tento vztah je označován jako B-H charakteristika a rozděluje látky na magneticky tvrdé se silnou hysterezní smyčkou a látky magneticky měkké s úzkou hysterezní smyčkou. B-H charakteristika popisuje chování materiálu po vložení do magnetického pole. Látky jejich domény se po vyjmutí z magnetického pole neuspořádávají zpět náhodně, to znamená, že jsou zmagnetovány, se označují jako látky ideálně magneticky tvrdé. Ideálně magneticky měkké látky po vyjmutí z magnetického pole magnetické vlastnosti ztrácejí. Magnetická indukce vyjádřená pomocí magnetizace je dána vztahem:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H}) \quad (18)$$


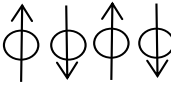

[21]

Magnetická susceptibilita je podle vztahu (15) skalární veličina, která může nabývat kladných i záporných hodnot. Záporná magnetická susceptibilita charakterizuje látky diamagnetické, příkladem diamagnetických látek jsou některé kovy, nekovové pevné látky, většina látek organického původu. Látky kladnou susceptibilitou jsou označovány za paramagnetické. Paramagnetickými látkami je většina kovů. Závislost susceptibilitu na teplotě se téměř neprojevuje u diamagnetických látek, ale u většiny paramagnetických látek se susceptibilita a teplotou mění. U alkalických kovů (paramagnetika) je susceptibilita teplotně nezávislá. Látky diamagnetické a paramagnetické jsou řazeny do skupiny slabě magnetických látek. Od slabě magnetických látek se látky silně magnetické liší pouze velikostí magnetizace. Hlavními představiteli silně magnetických látek jsou látky feromagnetické. Feromagnetické látky jsou charakteristické hysterezní křivkou, která vyjadřuje závislost magnetizace, magnetické indukce na intenzitě pole po cyklickém magnetování těchto látek. Popsané formy magnetismu jsou uvedeny v tabulce č. 1.

[19] [21]

Magnetické domény jsou spontánně zpolarizované oblasti materiálu. Vektorový součet momentů jednotlivých domén dává materiálu výsledný magnetický moment.

Tabulka 1 Formy magnetického chování látek

Spontánní orientace domén	<i>Feromagnetismus</i>		
		Shodně orientované magnetické momenty atomů	
	<i>Antiferomagnetismus</i>		
		Opačná orientace magnetických momentů	
	<i>Ferimagnetismus</i>		
		Opačná orientace magnetických momentů rozdílné velikosti	
Bez domén	<i>Paramagnetismus</i>	Krátkodosahové interakce magnetických momentů v orientaci s magnetickým polem	
	<i>Diamagnetismus</i>	Krátkodosahové interakce magnetických momentů v orientaci inverzní k magnetickému poli	

[2]

3.3. Mechanika kapalin

Mechanika kapalin je částí fyziky, která se zabývá rovnováhou a pohybem kapalin. V kapitole jsou uvedeny pouze rovnice z mechaniky tekutin nutné pro odvození destabilizace kapalin.

[23]

3.3.1. Rovnice kontinuity pro ideální kapaliny

Rovnice kontinuity je jedním ze vztahů popisujících kapalinu při pohybu pomocí pěti veličin. Těmito veličinami jsou tři složky rychlosti části tekutiny $v_i(x_1, x_2, x_3, t)$, $i = 1, 2, 3$ určující rozdělení rychlostí v kapalině. Zbývající dvě veličiny popisují termodynamický stav kapaliny, první veličinou je tlak $p(x_1, x_2, x_3, t)$ a druhou veličinou je hustota $\rho(x_1, x_2, x_3, t)$. Při pohybu kapaliny platí zákon zachování hmoty. V proudící kapalině je pevně zvolena libovolná jednoduchá uzavřená plocha S ohraničující oblast o objemu V . Pomocí hmotnostního toku $Q = \delta V / \delta t$, definice derivace a předpokladu, že hmotnostní tok je roven nule, má rovnice kontinuity pro ideální kapaliny tvar

$$\nabla v = 0 \tag{19}$$

[19] [24]

3.3.2. Eulerova rovnice pro ideální kapaliny

Eulerova hydrodynamická rovnice je pohybovou rovnicí ideální kapaliny, z toho vyplívá několik předpokladů, jakými je konstantní hustota ρ a rovnice kontinuity (19), dále Eulerova rovnice vychází z předpokladu ekvivalence se zákonem síly

$$F = m \cdot a, \tag{20}$$

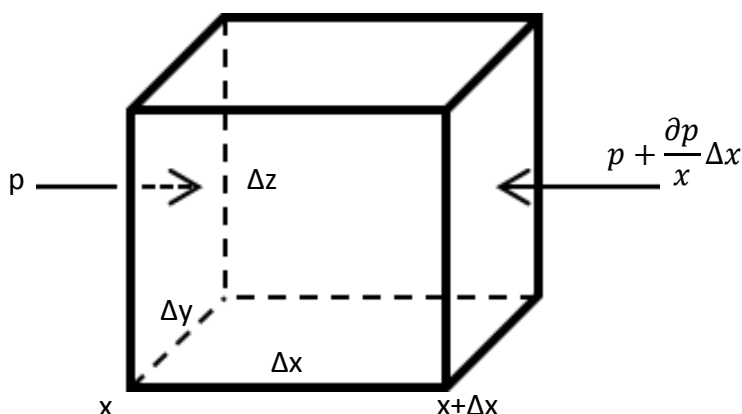
kde m je hmotnost a a je zrychlení. Z objemu kapaliny je uvažován malý objemový element dV a na něj působící tlak p dán vztahem

$$-\oint \vec{v} p dV \tag{21}$$

Podle vztahu $dp = dF/dS$ jsou získány tři rovnice pro jednotlivé složky, pro složku F_x platí $dF_x = dp \cdot (dy \cdot dz)$. Změna tlaku dp je dána vztahem $dp = \frac{dp}{dx} \cdot dx$, Pro všechny tři složky má vztah tvar

$$dF = -\vec{\nabla}p dV \quad (22)$$

[24]



Obrázek 3 Výsledná hustota tlakové síly na krychli je $-\vec{\nabla}p$

Pravá strana rovnice (19) je po použití vztahů $\vec{a} = d\vec{v}/dt$ a $m = \rho \cdot dV$ zapsána takto:

$$F = \rho \cdot dV \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (23)$$

Ze vztahů (22) a (23) je po úpravách rovnice ve tvaru

$$\rho \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\nabla}p = 0, \quad (24)$$

v této rovnici je rychlost $\vec{v}(x(t), y(t), z(t), t)$ závislá na dvou proměnných. Proto je nutné zavést pomocný vektor $\vec{r}(t)$, rovnice (24) lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}(\vec{r}(t), t)}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{r}} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = (\vec{v}\vec{\nabla}) \cdot \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (25)$$

Eulerova rovnice má tvar:

$$\rho \left[(\vec{v}\vec{\nabla}) \cdot \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right] + \vec{\nabla}p = 0, \quad (26)$$

pokud je amplituda $A \ll \lambda$, kde λ je vlnová délka, pak může být Eulerova rovnice zjednodušena na následující tvar.

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} p = 0 \quad (27)$$

[24] [25] [26]

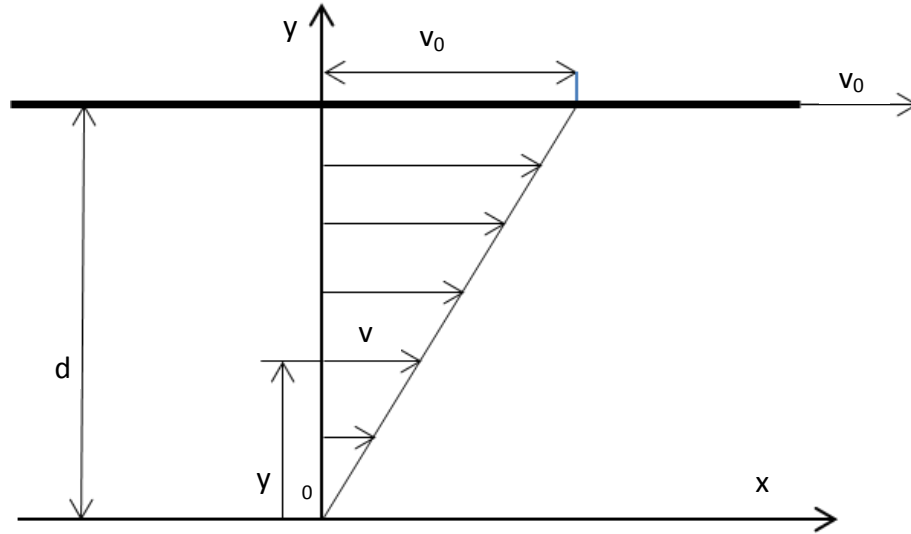
3.3.3. Navierova-Stokesova rovnice

Navierova –Stokesova rovnice je hlavním vztahem pro popis dynamického chování viskózních kapalin. Jen málo procesů je možné popsat rovnicemi pro ideální kapaliny. Rovnice pro ideální kapaliny popisují jevy, které by nastaly, kdyby v kapalině nepůsobilo vnitřní tření a neexistovalo sdílení tepla. K disipaci energie dochází vzájemným působením částí kapaliny, která se pohybují různou rychlostí.

[25]

Procesy podmíněné pohybem molekul jsou z termodynamického hlediska nevratné. Vnitřní tření kapaliny je viskozita umožňující popis skutečného chování tekutin. Experimentálně bylo dokázáno, že existuje-li smykové tření mezi pevnou látkou a kapalinou, je rychlost kapaliny na rozhraní s pevnou látkou nulová. Situace je uvedena na obrázku č. 4.

[19] [25]



Obrázek 4 Viskózní tekutina mezi dvěma rovnoběžnými deskami [27,8]

Navierova-Stokesova rovnice vychází z situace dvou pevných rovinných desek a mezi nimi se pohybující kapalina. Jedna z desek se pohybuje rovnoběžně malou rychlostí v_0 , druhá deska je v klidu. Síla F potřebná k pohybu horní desky je úměrná ploše desek S a podílu v_0/d , kde v_0 je rychlost a d je vzdálenost mezi deskami. Smykové napětí F/S je pak úměrné v_0/d .

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{v_0}{d}, \quad (28)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny.

[19]

Ve složitých situacích je z objemu kapaliny vybrán tenký hranol kapaliny, strany hranolu jsou rovnoběžné s prouděním kapaliny. Smykové napětí S působící na zvolený hranol je dáno vztahem:

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{\partial v_x}{\partial y}, \quad (29)$$

$\partial v_x / \partial y$ je rychlost změny deformace ve smyku. Obecně je smykové napětí úměrné rychlosti změny smykové deformace dáno vztahem:

$$S_{xy} = \eta \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (30)$$

Pro rovnoměrnou rotaci kapaliny platí $\partial v_x / \partial y$ je inverzní k $\partial v_y / \partial x$, pak $S_{xy} = 0$. S_{xy} je nulové, protože v rovnoměrně rotující kapalině nejsou smyková napětí. Složky smykového napětí v kapalině jsou tedy úměrné prostorovým derivacím různých složek rychlostí. Pro stlačitelné kapaliny existuje další člen ve smykových napětích, který je závislý na jiných derivacích rychlosti. Obecný výraz pro tenzor smykového napětí je ve tvaru:

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \eta' (\nabla v), \quad (31)$$

kde x_i je jedna z kartézských souřadnic x, y, z , v_i je některá z kartézských souřadnic rychlosti, η' je koeficient druhé viskozity kapaliny. Kromě koeficientu druhé viskozity kapaliny je pro popis kapaliny důležitý koeficient první viskozity kapaliny η , dříve uvedený jako dynamická viskozita. Pohybovou rovnici reálné kapaliny získáme zahrnutím vztahu viskózní síly na jednotku objemu V do Eulerovy pohybové rovnice (27). Z Eulerova rovnice je pak získána Navierova-Stokesova rovnice:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \varphi + \frac{\vec{f}_{visk}}{\rho} \quad (32)$$

Viskózní síla je dána vztahem:

$$\vec{f}_{viskózní} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} \quad (33)$$

Viskózní síla působící na objemový element je dána výslednicí sil na všech šesti stěnách objemového elementu. Rovnice viskózní síly vyjádřena pomocí koeficientů viskozit η a $(\eta + \eta')$ má následující tvar:

$$\vec{f}_{visk} = \eta \nabla^2 v + (\eta + \eta') \nabla (\nabla \cdot v) \quad (34)$$

Pohybová rovnice viskózní kapaliny má tvar:

$$\rho \left\{ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right\} = -\nabla p - \rho \nabla \varphi + \eta \nabla^2 v + (\eta + \eta') \nabla (\nabla \cdot v) \quad (35)$$

[19] [24] [25]

3.4. Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování je jedním ze způsobů výroby nanovláken. Jedná se o způsob výroby nanovláken, který k formování vláken z polymerního roztoku využívá silné elektrostatické pole. Základním fyzikálním principem elektrostatického zvlákňování je destabilizace volné hladiny kapaliny elektrickým polem.

[20]

3.5. Základní princip elektrostatického zvlákňování

Základní princip, který je využit při elektrostatickém zvlákňování, je vliv elektrostatického pole na destabilizaci hladiny kapaliny. Destabilizace hladiny je obvykle dosaženo uspořádáním zařízení pro elektrostatické zvlákňování, které je obvykle následující. Polymerní roztok, nebo tavenina je umístěn na nabíjené tyčce, válečku, popřípadě může být nabíjena kapilára. Kolektor, na nějž jsou ukládána nanovlákná, má opačnou polaritu.

[20] [27]

Vlivem elektrostatického pole dochází k destabilizaci hladiny. Při dosažení kritického napětí dochází k překonání kapilárního tlaku tlakem elektrickým a vznikají charakteristické kuželové útvary, které jsou známé jako Taylorovy kužely.

[20]

Taylorův kužel má charakteristický semivertikální úhel, jehož hodnota je $49,2901^\circ$. Po prolomení Taylorova kužele je z jeho vrcholu emitována polymerní tryska, která prochází přes stabilní část do oblasti bičující nestability, kde dochází ke dloužení vláken a vlákna jsou ukládána na uzemněný kolektor. V oblasti mezi polymerním roztokem a kolektorem dochází k odpaření většiny rozpouštědla, na kolektor tak dopadají suchá vlákna.

[20] [28]

Kritické napětí ovlivňuje povrchové napětí γ , poloměr kapiláry r_k , vzdálenost kolektoru h . Kritické napětí je možné zjistit pomocí vzorce

$$V_c = 4 \ln \left(\frac{2h}{r_k} \right) (1,3\pi\gamma) (0,09) \quad (36)$$

Podle tohoto vztahu je jednotkou výsledného kritického napětí kilovolt v případě, že poloměr kapiláry a vzdálenost kolektoru je zadána v centimetrech a povrchové napětí zadáno v jednotkách milinewton-metr⁻¹.

[20] [15] [29]

Elektrostatické zvlákňování je ovlivněno celou řadou parametrů, kterými jsou kapilarita, elektrického napětí, vodivost, typ polymeru, typ rozpouštěla, viskozita.

[27]

3.5.1. Princip samoorganizace při procesu hladinového elektrostatického zvlákňování

Pro popis samoorganizace volné hladiny kapaliny je rozhodující disperzní zákon, který vychází z Eulerovy pohybové rovnice kapalin (26) a má následující tvar

$$\omega^2 = (\rho g + \gamma k^2 - \varepsilon E_0^2 k) \frac{k}{\rho}, \quad (37)$$

kde ω^2 je kruhová frekvence závislá na gravitačním zrychlení g , hustotě kapaliny ρ , povrchovém napětí γ , vlnovém vektoru k a intenzitě elektrického pole E_0 . Pro zavedení disperzního zákona jsou nezbytné následující požadavky:

- Nulová viskozita kapaliny
- Nulová hustota kapaliny, tady kapalina musí být nestlačitelná
- Nekonečná hloubka kapaliny
- Kapalina musí být vodivá, aby byl elektrostatický potenciál na jejím povrchu konstantní
- Amplituda vlny musí být několikanásobně menší než vlnová délka $A \ll \lambda$.

Kritickým parametrem je pro kapalinu intenzita elektrického pole E_0 . Pokud E_0 dosáhne své kritické hodnoty je kruhová frekvence ω^2 nulová. Při překročení kritické hodnoty intenzity elektrického pole E_c je kvadrát kruhové frekvence ω^2 záporných hodnot. Důsledkem záporných hodnot kruhové frekvence ω se stává čistě imaginární veličinou v oboru komplexních čísel. Imaginární část kruhové frekvence $q = \text{Im}(\omega)$ se skokově změní na růstový faktor amplitudy podle vztahu:

$$\xi = A^{qt} \exp(ikx) \quad (38)$$

Vlna se s nezadržitelně rostoucí amplitudou stává stacionární, proto se po překročení kritické hodnoty intenzity elektrického pole objeví jediná časově nezávislá stojatá vlna, vzniklá vlna je ta s nejvyšší hodnotou růstového faktoru.

Kruhové frekvence ω_c je nulová, pokud intenzita vnějšího elektrického pole E_0 přesáhne kritickou hodnotu intenzity elektrického pole E_c . Vlnový vektor k má podle disperzního zákona, pro nulovou kruhovou frekvenci, kritickou hodnotu k_c

$$k_c = \varepsilon E_0^2 / 2\gamma \quad (39)$$

Dosazením kritické hodnoty vlnového vektoru k_c (39) do disperzního zákona (37) lze vyjádřit kritickou intenzitu elektrického pole E_c

$$E_c = \sqrt[4]{4\gamma\rho g / \varepsilon^2} \quad (40)$$

Nad touto hodnotou intenzity elektrického pole E_c se kapilární vlny stávají nestabilní. Z rovnice (10) plyne

$$\frac{1}{2} \varepsilon E_c^2 = \frac{\gamma}{a_k} \quad (41)$$

Jedná se o rovnovážný vztah mezi elektrickým tlakem (40) a kapilárním tlakem $p = \gamma/a_k$, kde a je kapilární délka $a_k = \sqrt{\gamma/\rho g}$.

[16]

3.6. Destabilizace volné hladiny kapaliny magnetickým polem

K popisu destabilizace volné hladiny kapaliny jako výchozí vztah je použit disperzní zákon, který se liší od disperzního zákona pro destabilizaci kapalin elektrickým polem (36) pouze nahrazením elektrického členu, členem magnetickým.

$$\omega^2 = gk + \frac{\gamma k^3}{\rho} + \frac{2\sigma_m k^2}{\rho}, \quad (42)$$

kde σ_m je Maxwellovo napětí. Disperzní zákon pro magnetické pole je v obdobném tvaru jako disperzní zákon pro pole elektrické. První dva členy jsou shodného charakteru jako u disperzního zákona pro pole elektrické (37), jedná se o člen gravitační a člen kapilární, třetí

člen je člen, který zahrnuje magnetické síly, které jsou obsaženy v Maxwellově napětí σ_m , které je vyjádřeno z tenzoru Maxwellova napětí σ_{ik}

$$\sigma_{ik} = \varepsilon_0 E_i E_k + \frac{1}{\mu_0} B_i B_k - \frac{1}{2} \left(\beta \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \delta_{ik}, \quad (43)$$

kde $\beta = 1$ (rovnost platí pro vodivé kapaliny), δ_{ik} je Kronekerova delta. Pro ploché vrstvy kapalin kolmé na vektor intenzity elektrického pole i vektor intenzity magnetického pole je vztah (42) zjednodušen na následující tvar:

$$\sigma_m = -\frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad (44)$$

[30] [31]

Pro destabilizaci hladiny magnetické kapaliny magnetickým polem je důležitý magnetický člen ze vztahu (42), kterým má tvar $-B^2/(2\mu_0)$. Pro kapaliny jsou možné dva přístupy vyjádření Maxwellova napětí v závislosti na intenzitě magnetického pole. Prvním možností je přístup podle Browaeysse pro zvuková media, podle tohoto přístupu je Maxwellovo napětí následující

$$\sigma = -\frac{B^2}{2\mu_0} = -\frac{\mu_0}{2} \frac{\chi_m^2}{(1 + \chi_m)(2 + \chi_m)} H^2, \quad (45)$$

kde χ je magnetická susceptibilita kapaliny. Druhý přístup je podle Abou a Maxwellovo napětí je pak dáno vztahem:

$$\sigma_m = -\frac{B^2}{2\mu_0} = -\frac{\mu_0 \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^2}{1 + \frac{\mu_0}{\mu}} H^2 = -\frac{\mu_0 \chi_m^2 (\chi + 1)}{2(2 + \chi_m)} H^2 \quad (46)$$

Vztah (45) je upraven podle vztahu $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$.

Pro zjištění kritického Maxwellova napětí, nutného k destabilizaci povrchu magnetické kapaliny, je stanovena podmínka $\omega = 0$, po dosazení podmínky do vztahu (40), má disperzní zákon tvar

$$0 = g + \frac{\gamma k^2}{\rho} + \frac{2\sigma_m k}{\rho} \quad (47)$$

Podmínkou pro získání právě jednoho řešení kvadratické rovnice musí být diskriminant nulový

$$D = \left(\frac{2\sigma_m}{\rho}\right)^2 - 4\frac{\gamma g}{\rho} = 0, \quad (48)$$

Maxwellovo napětí je pak vyjádřeno

$$\sigma_{mc} = \sqrt{\gamma\rho g}, \quad (49)$$

zavedením kapilární délky a jako $a = \sqrt{\gamma/\rho g}$ a úpravou do tvaru $\rho g = \gamma/a^2$, lze kritické maxwellovo napětí zapsat v tomto tvaru:

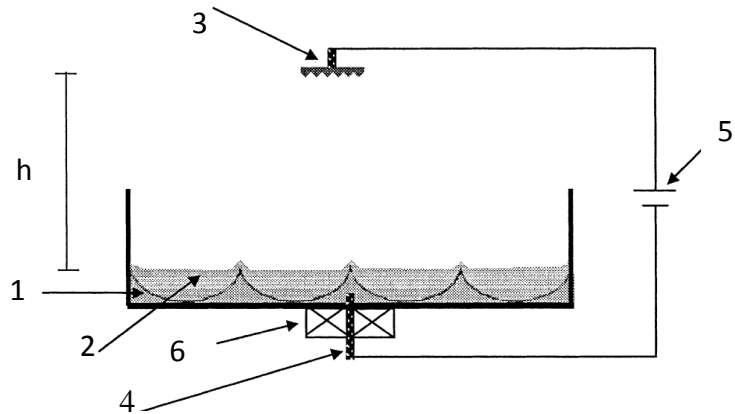
$$\sigma_{mc} = \frac{\gamma}{a^2} \quad (50)$$

[30]

3.7. Využití feromagnetických kapalin při elektrostatickém zvlákňování

Využití feromagnetické kapaliny v elektrostatickém zvlákňování bylo publikováno v roce 2004 Yarinem a Zussmanem. Ve článku je popsán systém dvou vrstev kapalin. Feromagnetická kapalina je v systému spodní kapalinou. Vrchní vrstva systému je polymerní roztok, kterým byl v popsáném experimentu polyethylenoxid v vodě a etanolu. Použitou feromagnetickou kapalinou byl černý oxid železitý, neboli magnetit (Fe_3O_4) ve směsi se silikonovým olejem. Magnetické pole bylo vytvořeno silným permanentním magnetem, nebo elektromagnetem umístěným pod systémem navrstvených kapalin. První elektroda byla umístěna pod nádobou s kapalinami a druhá elektroda byla umístěna proti. Schéma experimentu je na obrázku

[3]



Obrázek 5 Schéma elektrostatického zvlákňování využívající magnetické kapaliny. 1-feromagnetická kapalina 2-polymerní vrstva, 3-protielektroda 4-elektroda, 5-zdroj napětí, 6-silný permanentní magnet, nebo elektromagnet [18]

Nestabilitou magnetické kapaliny v magnetickém poli se vytvoří kuželové hroty, z nichž jsou po přidání pole elektrického emitovány polymerové trysky směrem ke kolektoru.

[3]

4. Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou magnety ze vzácných zemin, které se vyznačují spontánní magnetizací, to znamená, že kolem sebe vytvářejí magnetické pole bez potřeby budícího vinutí a elektrického výkonu. Pouze v případě změny velikosti magnetického pole permanentních magnetů je potřeba vyšší energie. Permanentní magnety jsou popisovány pomocí B-H charakteristiky. Podle této charakteristiky jsou magnety ze vzácných zemin řazeny do magneticky tvrdých materiálů, tedy materiálů s širokou hysterezní smyčkou.

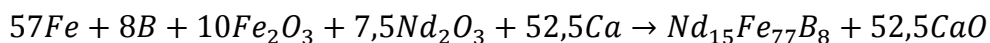
[32]

4.1. Neodymové magnety

Neodymové magnety jsou charakterizovány sloučeninou $Nd_2Fe_{14}B$, jedná se o základní sloučeninu skupiny moderních permanentních materiálů. V současnosti tyto materiály vykazují nejlepší poměr cena, výkon. Magnety na bázi NdFeB jsou nejsilnějšími typy magnetů s vynikajícími magnetickými vlastnostmi. Jejich nevýhodou je rychlá koroze, které se zamezuje povrchovou úpravou. Nejčastěji používaná povrchová úprava je niklování, zinkování, nebo úprava pryskyřicí. Další nevýhodou je nízká tepelná odolnost. U neodymových magnetů třídy N dochází ke ztrátě magnetizace při provozní teplotě $80^\circ C$. K úplné demagnetizaci dochází při teplotách nad $310^\circ C$. K demagnetizaci však nedochází vlivem působení ostatních magnetů, ani pádem. Oblast použití těchto magnetů je v současnosti především v záznamových hlavách harddisků, při výrobě malých mikrofonů, reproduktorů ve sluchátkách.

[33]

Pro výrobu neodymových magnetů je obvykle použita technologie práškové metalurgie. Základem je většinou reakce, jejíž průběh je dán rovnicí



Magnetický prach je produkován v inertní atmosféře a následně stlačen v ocelové, nebo gumové formě. V ocelových formách jsou vyráběny magnety konečných tvarů. Gumové formy jsou použity pro výrobu velkých bloků, které jsou následně děleny. Před lisovacím

procesem a během procesu je použito silné magnetické pole, které určuje směr magnetizace, orientaci Weissových domén. Srovnání částic je dáno izotropní povahou slitiny a zlepšuje magnetickou indukci a ostatní magnetické vlastnosti permanentních magnetů. Po vylisování následuje spečení a materiál dosáhne tuhé konzistence a chová se jako permanentní magnet.

[32]

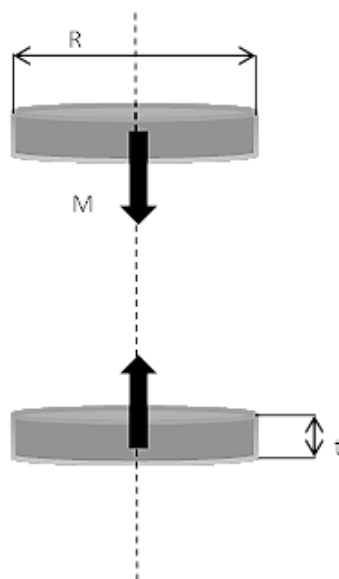
Neodymové magnety jsou stabilní vůči většině rozpouštědel, extrémně korozivně reaguje materiál na soli a kyseliny. Materiál magnetů NdFeB je extrémně křehký, při namáhání dochází k jeho tříštění.

[32] [33]

4.1.1. Sílové účinky působící mezi cylindrickými magnety v závislosti na změně vzdálenosti mezi magnety

Sílové účinky mezi permanentními magnety, které jsou umístěny v ose pod sebou, mohou být určeny dvěma způsoby. Na obrázku je uvedeno schéma uspořádání.

[34]



Obrázek 6 Uspořádání magnetů

- Přídržnou silou působící na magnety v závislosti na změně vzdálenosti mezi magnety.[34]
- Vyjádřením magnetické síly, která působí na horní magnet [35]

Výpočet přídržné síly mezi magnety, lze provést pomocí vztahu:

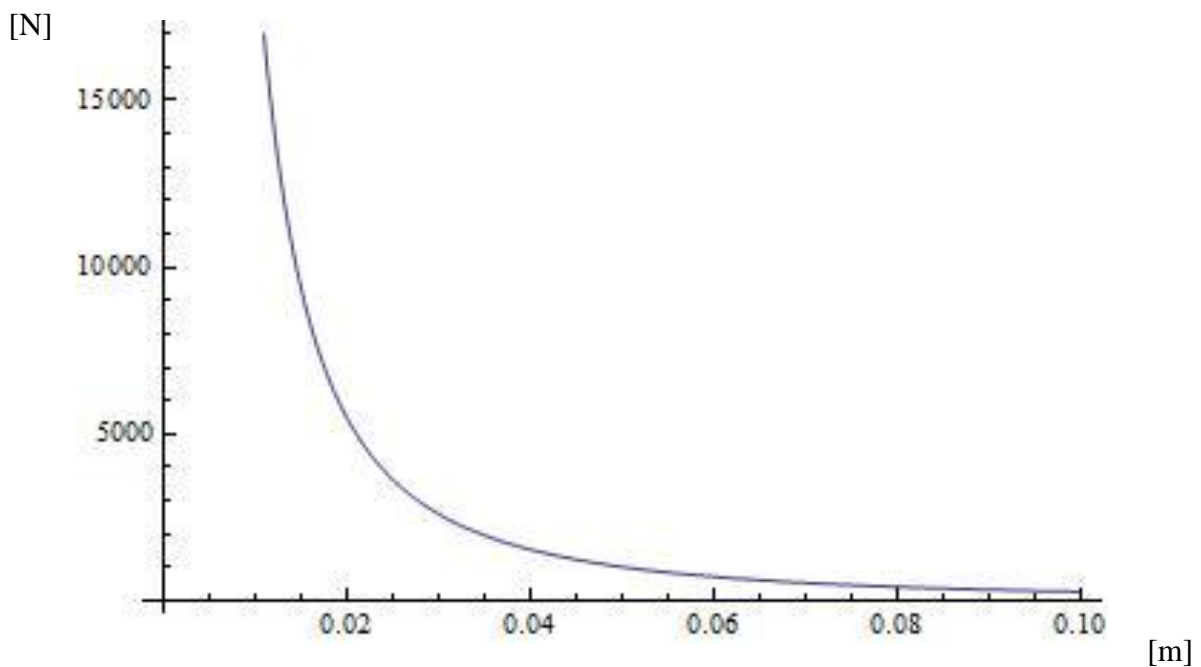
$$F_z \approx -\frac{1}{2}\pi K_d R^4 \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x + 2t_m)^2} - \frac{2}{(x + t_m)^2} \right], \quad (51)$$

kde $K_d = \mu_0 M^2 / 2$ je konstanta magnetostatické energie, R je poloměr magnetu, x je vzdálenost, t_m je výška magnetu. Na základě dat o magnetech poskytnutých dodavatelem byla magnetizace M aproximována hodnotou maximální magnetické indukce. Hodnota maximální magnetizace se v grafu hysterezní křivky nachází těsně pod magnetizací. Graf hysterezní křivky poskytnutý dodavatelem magnetu je v příloze č.1. Vztah (51) lze použít pouze za následujících podmínek:

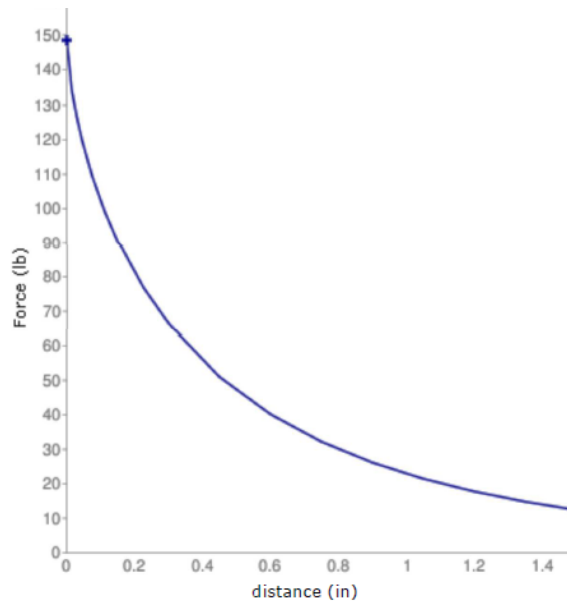
- Magnety musí být umístěny v ose, vyosení $l = 0$
- Výška magnetů musí být shodná, tedy $t_1 = t_2 = t$.

Průběh závislost velikosti síly na vzdálenosti mezi dvěma permanentními magnety je vykreslen na obrázku č. 7. Se vzrůstající vzdáleností je velikost síly působící mezi magnety výrazně snižována.

[34]



Obrázek 7: Závislost velikosti magnetické síly na vzdálenosti získaná ze vztahu (50)



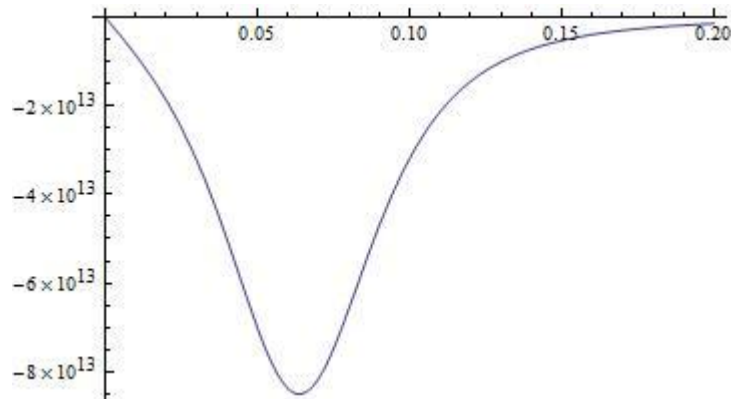
Obrázek 8 Závislost velikosti magnetické síly na vzdálenosti (podle informací od dodavatele magnetů)

[36]

Magnetická síla působící na horní magnet v magnetickém poli tvořeném dvěma permanentními magnety je vztahem:

$$F_m = \frac{M}{2\mu_0} \pi R^4 (M \pi R^2 t_m) \left\{ \frac{1}{\left[R^2 + \left(x + \frac{t_m}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{\left[R^2 + \left(x - \frac{t_m}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (52)$$

Podle vztahu (52) je má síla působící na horní magnet následující průběh, který je uveden na obrázku č. 9.



Obrázek 9 Síla působící na horní magnet

[35]

5. Vliv magnetického pole na feromagnetickou disperzi

V této části práce je pozorován vliv magnetického pole na feromagnetickou disperzi.

5.1. Návrh upnutí magnetů

Nástroj pro upnutí magnetů musí zajistit následující požadavky:

- Bezpečné upnutí magnetů
- Minimální ovlivnění magnetického pole magnetů
- Možnost posuvu magnetů

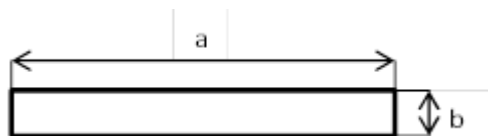
Pro zajištění bezpečného upnutí magnetů byl navržen nástroj skládající se ze dvou lůžek, do kterých jsou magnety vloženy. Lůžka jsou od sebe oddělena a udržována v požadované vzdálenosti pomocí tří závitových tyčí. Po závitových tyčích je pomocí matek zajištěn posun lůžka, kterým je umožněno nastavení požadované vzdálenosti. Lůžka pro magnety musela být z nemagnetického materiálu, proto byly vyrobeny ze silonu, který zajišťuje dostatečnou pevnost. Použité závitové tyče byly nerezové.

5.2. Magnetické pole

K vytvoření magnetického pole byly použity dva neodymové magnety válcového tvaru se stupněm neodymového magnetu N42. Neodymové magnety jsou složeny z kovů vzácných zemin, nejběžněji používané jsou magnety se složením NdFeB. Stupeň neodymového magnetu závisí na použitém materiálu, čím vyšší stupeň neodymového magnetu, tím je magnet silnější. V současné době jsou nejsilnější dostupné neodymové magnety N52.

K dispozici byla dva rozměry permanentních magnetů značení podle obrázku:

1. $a = 7,62 \text{ cm}$ $b = 0.3175 \text{ cm}$
2. $a = 7,62 \text{ cm}$ $b = 1,27 \text{ cm}$

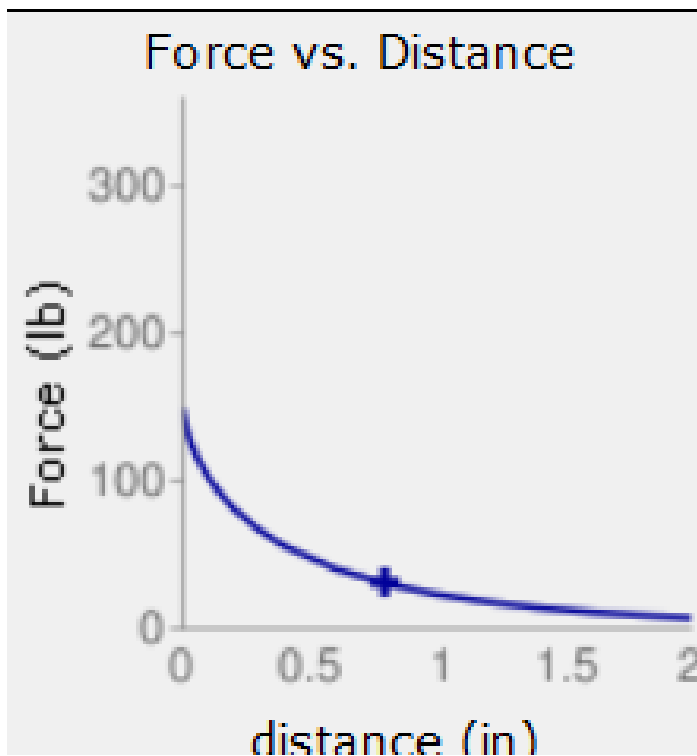


Obrázek 10 Rozměry magnetu

Podle dodavatele magnetů „KJ magnetics“ a informací dostupných na jeho webových stránkách byla zjištěna maximální magnetická indukce magnetů, která byla 0,263 Tesla pro první rozměr magnetu. Pro druhý rozměr byla uvedena magnetická indukce 1,231 Tesla.

[36]

30.73 lb

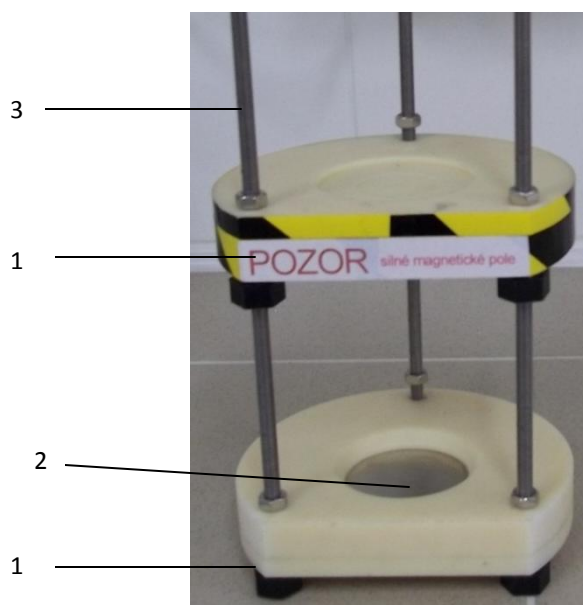


Obrázek 11 Závislost síly na vzdálenosti dvou magnetu ($a = 7,62 \text{ mm}$ $b = 1,27 \text{ mm}$)

www.kjmagnetics.com

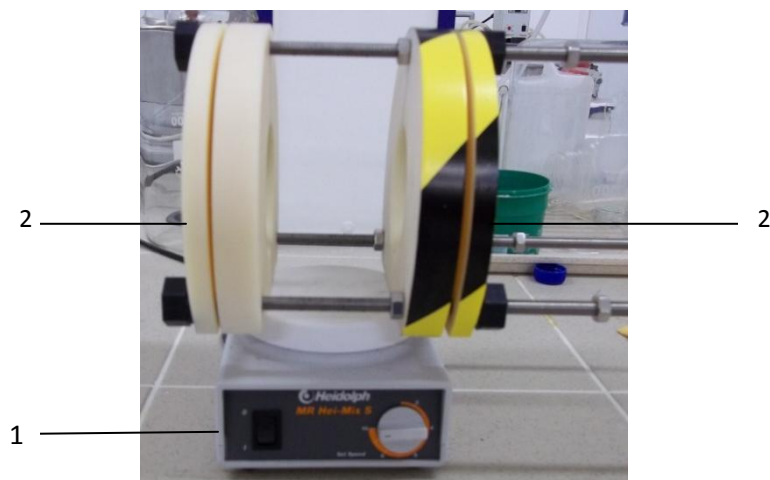
Pro upnutí magnetů byl použit nástroj, popsany v předešlé kapitole, se silonovými lůžky pro magnety, pohybujících se po nerezových závitových tyčích. Nástroje je na obrázku č.3.

V Prvním uspořádání experimentu byl použit držák magnetů ve vertikální poloze, pracovního prostoru byla umístěna Petriho miska s pozorovnou disperzí.



Obrázek 12 Nástroj pro upnutí magnetů 1 Silonová lůžka promagnety, 2 permanentní magnety, 3 opěrné závitové tyče

Jako druhé uspořádání bylo zvoleno umístění petriho misky na magnetické míchadlo, na kterém byl horizontálně umístěn držák magnetů. Uspořádání je znázorněno na obrázku č. Uspořádání experimentu s magnetickým míchadlem bylo použito pro generování pohybu částic a zjištění tlumivých účinku magnetostatického pole po přiložení permanentních magnetů.



Obrázek 13 Druhé uspořádání experimentu 1 magnetické míchadlo, 2 lůžka s permanentními magnety

5.3. Použité disperze

Pro experimenty bylo použito několik typů disperzí. V prvních experimentech byly použity disperze částic nanoželeza v různých polymerních roztocích. Dále byly prováděny experimenty s disperzemi nanoželeza v oleji a experimenty s feromagnetickými kapalinami.

Polymerní disperze

Magnetické kapaliny použité pro experiment byly disperze nanoželeza v polymerním roztoku. Vybranými polymerní roztoky byl polyvinylbutyral (PVB), použitým rozpouštědlem byl etanol, a polyuretan (PU), **rozpouštědlem** byl . Byly použity čtyři disperze:

1. nZVI/PVB
2. nZVI/8%PU
3. nZVI/10%PU
4. nZVI/15%PU

Použité roztoky byly převzaty od studentky Jarošové.

Disperze nanočástic v oleji

Částice nZVI byly dispergovány v oleji. Olejové disperze byly připraveny na Ústavu nových technologií. Experimenty byly prováděny s disperzemi, jejichž poměry nanočástic železa v oleji byly následující:

1. 1:2 olej / nZVI
2. 1:2,5 olej / nZVI
3. 1:3 olej / nZVI
4. 1:4 olej / nZVI

Feromagnetické kapaliny

Vzorky feromagnetických kapalin byly získány z Ústav nanobiologie a strukturní biologie AV. Feromagnetické částice v kapalině byly magnetit Fe_3O_4 , nosná kapalina byla voda a u dalších vzorků dextran. Vzorky byly pozorovány v pořadí:

1. Kyselá vodná feromagnetická kapalina
2. Dextran koncentrace 15,91 mg/ml
3. Dextran koncentrace 18,50 mg/ml
4. Dextran koncentrace 18,50 mg/ml

5.3.1. Chování polymerních disperzí v magnetickém poli

První uspořádání experimentu

U disperze 1. nZVI/PVB docházelo k orientovanému vzniku aglomerátů. Vznikající aglomeráty pravděpodobně kopírují magnetické indukční čáry. U disperzí s roztokem polyuretanu nanočástice aglomerovaly do jehlicovitých útvarů. Ten to jev byl nejvýraznější u disperze 4. nZVI/15%PU, nejméně patrný byl tento jev u disperze 3. nZVI/10%PU. Popis chování disperzí v magnetickém poli je uveden v tabulce č. 1.

Tabulka 2 Chování disperzí v magnetickém poli

Disperze	Vodivost	Doba působení [s]	Vzdálenost magnet-magnet [cm]	Chování disperze
nZVI/PVB	253 $\mu\text{S/cm}$	180	2	Tvorba aglomerátů podle indukčních čar magnetického pole
nZVI/8% PU	2,42 mS/cm	30	7	Tvorba aglomerátů ve tvaru jehliček, nejvíce pookrajích Petriho misky
nZVI/12% PU	1179 $\mu\text{S/cm}$	120	7	Omezená tvorba aglomerátů, vysoký počet sedimentovaných částic v použité disperzi
nZVI/15% PU	701 $\mu\text{S/cm}$	120	2	Omezená tvorba aglomerátů, vysoký počet sedimentovaných částic v použité disperzi

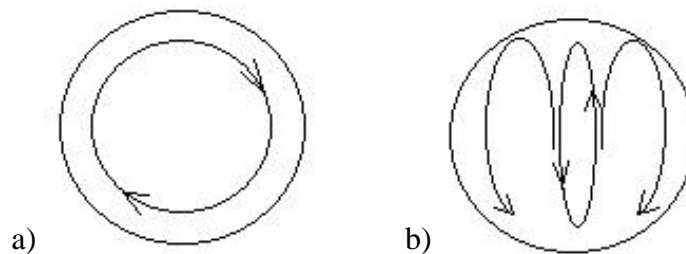
Druhé uspořádání experimentu

Chování disperzí v případě usprádaní s magnetickým míchadlem, na němž je horizontálně umístěn držák magnetů, je uvedeno v tabulce č 2.

Tabulka 3 Chování disperzí v magnetickém poli (druhý experiment)

Disperze	Ultrazuková lázeň	Doba působení [min]	Chování disperze	Chování disperze popříložením statického magnetického pole
nZVI8% PU	ne	3	Pohyb dispergovaných částic po kružnici, více aglomerátů ve středu a na okrajích nádoby	Dochází k tvorbě aglomerátů ve tvaru jehliček, hromadění aglomerátů na stěně nádoby
nZVI/8% PU	ano	3	Pohyb aglomerátů po kružnici, méně aglomerátů ve středu a více na okrajích nádoby	Dochází k tvorbě aglomerátů ve tvaru jehliček a změně směru jejich pohybu hromadění aglomerátů na stěně nádoby
nZVI/12%P	ne	3	Aglomeráty částic jsou rozmístěny po kružnici	Nebyl pozorován žádný pohyb aglomerátů
nZVI/12%P	ano	3	Kumulace aglomerátů ve středu nádoby do kruhového obrazce	Deformace kruhového obrazce protažením směrem k magnetům
nZVI/15%P	ne	3	Rovnoměrné rozložení aglomerátů, nebyl pozorován žádný pohyb	Nebyly pozorovány změny pohybu aglomerátů
nZVI/15%P	ano	3	Rovnoměrné rozložení aglomerátů, minimální špatně pozorovatelný pohyb aglomerátů	Minimální deformace pohybu, zachován charakter pohybu způsoben magnetickým míchadlem
nZVI/PVB	ne	3	Rovnoměrné rozložení aglomerátů	Nedochází k pozorovatelným změnám pohybu
nZVI/PVB	ano	3	Tvorba malých aglomerátů, aglomeráty jsou rozmístěny symetricky	Deformace původního rozložení

Magnetické míchadlo generovalo pohyb aglomerátů po kružnici. Přiložením magnetostatického pole docházelo k deformaci pohybu aglomerátů podle obrázku č. 14.



Obrázek 14 Charakter pohybu aglomerátů: a) pohyb aglomerátů generovaný magnetickým míchadlem
b) pohyb aglomerátů po přiložení magnetostatického pole

U všech typů použitých disperzí docházelo ke změnám charakteru pohybu agregátů po přiložení magnetostatického pole. Po odstranění magnetostatického pole docházelo k obnovení pohybu aglomerátů, který byl generován magnetickým míchadlem. Nevýraznější změny pohybu agregátů byly pozorovány u disperzí nZVI/8%PU, naopak k nejmenším deformacím pohybu aglomerátů docházelo u disperzí nZVI/15%PU a nZVI/PVB. U disperzí s vyšší koncentrací polymerního roztoku je pohyb aglomerátu minimální a obtížně pozorovatelný. Snížená schopnost pohybu aglomerátů je nejspíše způsobena vyšší viskozitou disperze. Přidáním magnetostatického pole docházelo k útlumu pohybu aglomerátů.

5.4. Chování olejových disperzí v magnetickém poli

Pro pozorování olejových disperzí v magnetickém poli byly navrženy dva experimenty. První experiment byl zaměřený na pozorování volné hladiny. U druhého experimentu byl pozorován pohyb části v uzavřené nádobě.

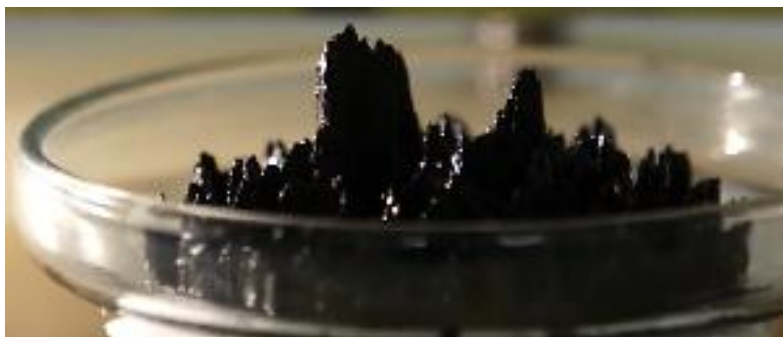
5.4.1. Pozorování volné hladiny disperze

Při pozorování olejových disperzí s nZVI bylo použito první uspořádání experimentu, to znamená, že držák pro upnutí magnetů byl ve vodorovné poloze. Na magnet upevněný ve

spodní oblasti držáku byly vkládány disperze s různými koncentracemi částic, na Petriho miskách. Posuvem vrchního lůžka byla měněna vzdálenost a byl pozorován vliv vzdálenosti na změny chování kapaliny.

U olejových disperzí s nízkým podílem nZVI, konkrétně u disperze 1. olejové disperze (1:2 olej/nZVI) nedocházelo k destabilizaci hladiny disperze. Ale u olejových disperzí 2.-3. už k destabilizaci hladiny v magnetostatickém poli docházelo. V závislosti na koncentraci částic v disperzi a vzdálenosti magnetů docházelo k formování různého počtu kuželových hrotů s různou velikostí. Charakter chování olejových disperzí v závislosti na přibližování lůžek s magnety je přehledově uveden v tabulce č. 4.

U disperze s nejnižší koncentrací částic nedohází k žádné nestabilitě. U ostatních koncentrací dochází k okamžitému vybuzení hrotů po vložení nádoby s magnetickou disperzí. V případě disperze s největší koncentrací částic dochází ke skokovému zvýšení hrotů už ve vzdálenosti 4 cm, při klesající koncentraci částic v disperzi je potřeba menší vzdálenost pro skokové zvětšení velikosti hrotů disperze. Dosažení hrotů disperze, konkrétně disperzí s koncentracemi 1:2,5 a 1:3, došlo pravděpodobně k snížení vzdálenosti mezi lůžky magnetů na velikost vybuzených hrotů. U všech disperzí, u kterých došlo k vybuzení hrotů, byly i po oddálení magnetů zachovány maximální velikosti hrotů, tyto hroty byly dále časově stabilní.



Obrázek 15 Destabilizace disperze s nejvyšší koncentrací částic, skokové zvýšení hrotu kapalin

Tabulka 4 Chování olejových disperzí v magnetickém poli

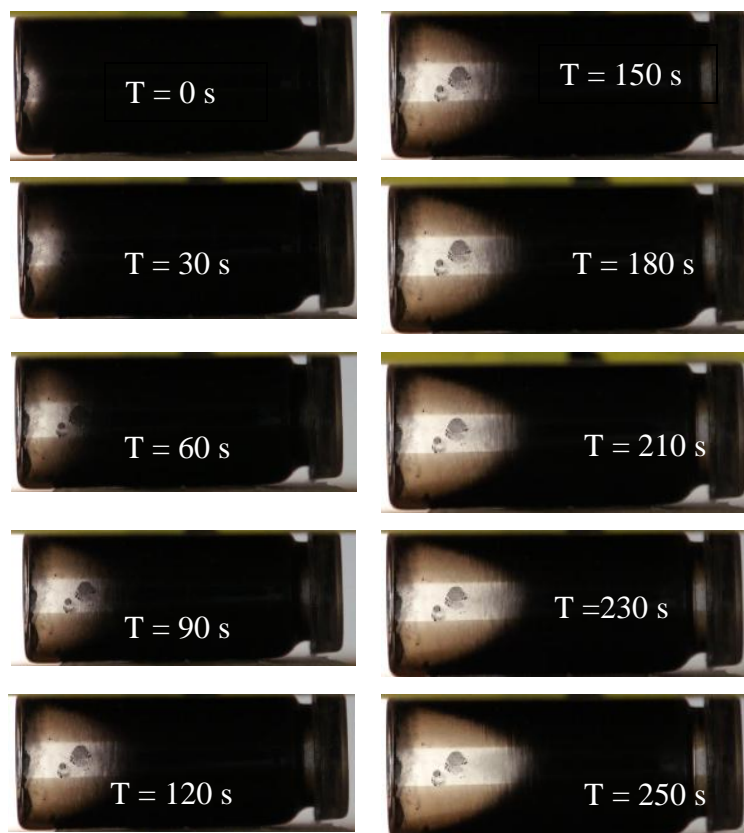
Disperze olej/nZVI	Vzdálenost lůžek magnetů [cm]					4	3,5	3	2,5	2
	15	10	8	6						
1:4	bez změny				skokové zvýšení kuželových hrotů	zachování původního uspořádání	zachování původního uspořádání	zachování původního uspořádání	hroty kapaliny dosahují k protilehlému magnetu	
1:3	bez změny				bez změny	skokové zvýšení kuželových hrotů	zachování původního uspořádání	zachování původního uspořádání	zachování původního uspořádání	hroty kapaliny dosahují k protilehlému magnetu
1:2,5	bez změny				bez změny	bez změny	bez změny	skokové zvýšení kuželových hrotů	skokové zvýšení dalších hrotů	hroty kapaliny dosahují k protilehlému magnetu
1:2	nedochází k destabilizaci volné hladiny kapaliny									

5.4.2. Pozorování olejových disperze v uzavřené nádobě

Při pozorování olejových disperzí v magnetickém poli byla použita vertikální poloha držáku magnetů. Na spodním magnetu byla umístěna uzavřená válcová nádoba. Vrchním lůžkem s magnetem byl zajištěn posuv.

Disperze použité v tomto experimentu byly shodné s disperzemi použitými v prvním experimentu. Pouze u disperzí s nejnižší koncentrací částic bylo jejich chování pozorovatelné. U disperzí s vyšší koncentrací nebylo tento proces možno sledovat, důvodem je velmi vysoká koncentrace disperze, pohyb částic je navíc vysokou koncentrací částic omezen. U disperzí s vyšší koncentrací částic nebyla změna pozorovatelná.

Chování disperze s nejnižší koncentrací po vložení do magnetického pole měla následující průběh. Od konce nádoby se začínaly částice rozestupovat a začal se tvořit klín kapaliny se ztatečně nižší koncentrací částic. Tento útvar byl tvořen symetricky.



Obrázek 16 Vývoj chování olejové disperze s nejnižší koncentrací nanoželeza (1:2) v čase T

5.5. Chování feromagnetických kapalin v magnetickém poli

Feromagnetické kapaliny jsou na rozdíl od disperzí nZVI stabilizovány. U všech vzorků feromagnetických nedocházelo k tvorbě nestabilit v případě u spořádání experimentu se dvěma magnety s držákem ve svislé poloze. Po vložení magnetické kapaliny do statického magnetického pole nebyla vyvolána žádná nestabilita. Výchozí poloha držáku byla nastavena na 15 cm. Horní magnet byl přibližován k volné hladině kapalin, ani při maximálním možném přiblížení k hladině nedošlo k vybuzení nestability. Tvar kapky na petriho misce byl zachován.

Dále bylo pozorováno chování magnetických kapalin při vlivu silového působení pouze jednoho magnetu. Magnet byl umístěn ve vrchním lůžku, které bylo v obrácené poloze, přesah magnetu přes lůžko byl 5 mm. Magnet byl postupně přibližován ke hladině kapaliny a bylo sledováno, kdy dojde k destabilizaci hladiny. Byla zaznamenána vzdálenost magnetu při počátku formování kuželového útvaru. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka 5 Vzdálenost potřebná k destabilizaci hladiny feromagnetické kapaliny.

Ferokapalina	Vzdálenost magnetu při zahájení destabilizace [cm]
1.	1,2
2.	2
3.	2
4.	2,5

U dextranové feromagnetické kapaliny dochází se zvyšováním koncentrace, k zahájení destabilizace feromagnetické kapaliny ve větší vzdálenosti magnetu od hladiny.

U všech feromagnetických kapalin docházelo k formování kužele na okraji Petriho misky a byly přitahovány k okraji magnetu. Po oddálení magnetu, se došlo k zániku zformovaného kužele. V případě feromagnetických kapalin byl tvořen vždy jen jeden kužel. Vznik kužel je na obrázku č. 17.



Obrázek 17 Formování kuželového tělesa z kapky feromagnetické kapaliny v magnetostatickém poli

6. Měření magnetického pole

Měření magnetického pole bylo realizováno na Ústavu mechatroniky a technické informatiky. Jedná se o měření rozložení prostorového magnetického pole.

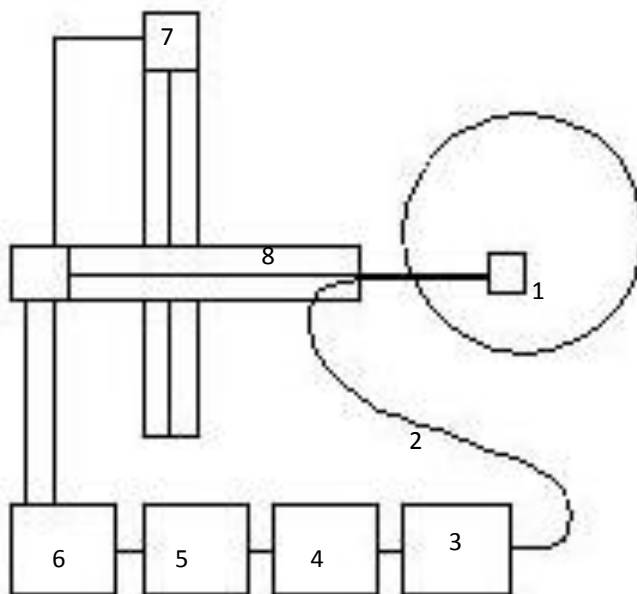
Popis měření

K měření je použita komerční Hallova 3D sonda, která využívá principu Hallova jevu. Hallův jev je Sonda byla umístěna do pracovního prostoru držáku magnetů, kde byla nastavena vzdálenost mezi silonovými lůžky 3 cm.

[37]

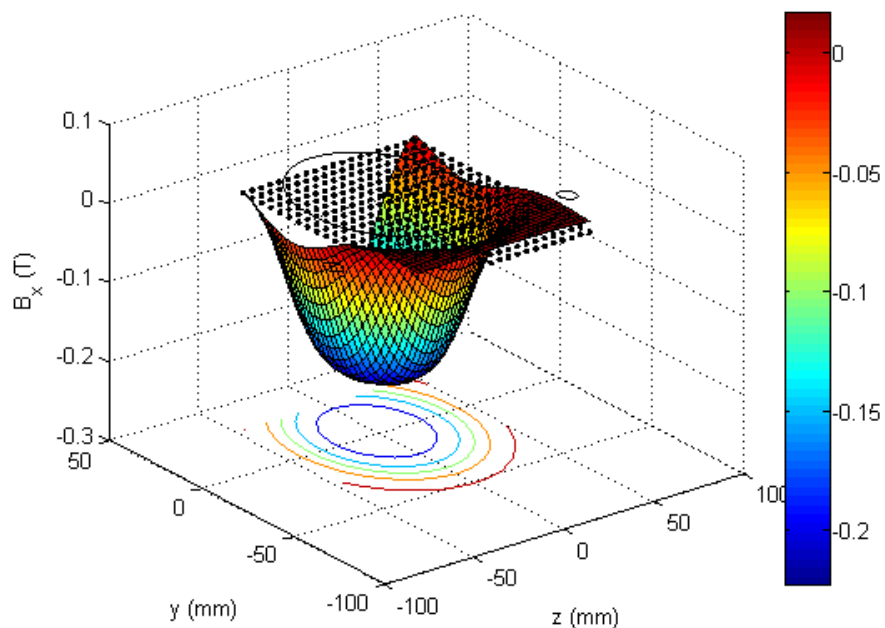
Na obrázku č. 18 je uvedeno schéma měřicího zařízení. Hallova sonda je připojena na průtokoměr, dále dochází k zesílení signálu a převedení signálu do digitální podoby. Naměřená data jsou zpracována v programu MATLAB.

[37]



Obrázek 18 Schéma měřicího zařízení: 1 Hallova sonda, 2 průtokoměr, 3 zesilovač signálu, 4 převodník, 5 počítač, 6 mechanismus pro posuv sondy, 7 posuv v ose x, 8 posuv v ose y.

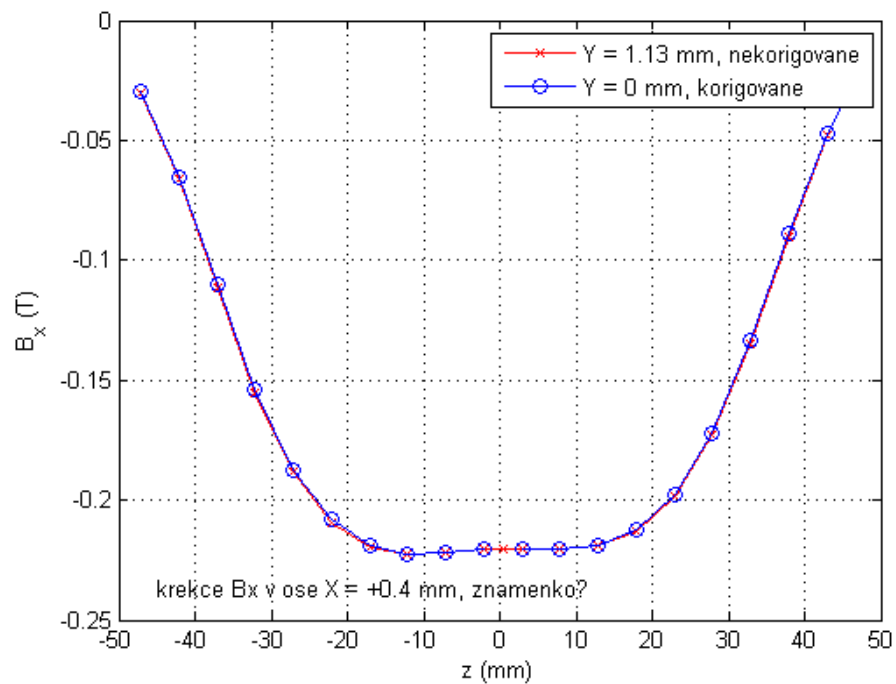
Jedním z možných výstupem měření, který byl pro daný případ vybrán jako nejvhodnější, je 3D graf prostorového rozložení magnetické indukce. Graf je uveden na obrázku č.



Obrázek 19 Magnetická indukce v ose x měřeno ve výšce $z = 0$

Z obrázku č 19 je patrné, že magnetické pole tvořené permanentními magnety dosahuje maximální magnetické indukce v okolí středu magnetů. Důvodem záporných hodnot v grafu je opačná orientace Hallovy sondy. Maximální magnetická indukce v ose B_x byla naměřena 0,22 T. To je zřejmé z 2D grafu, který je uvedený na obrázku č. 20.

[37]



Obrázek 20 magnetická indukce v ose x

Kolísání hodnot v oblasti minima grafu bylo s největší pravděpodobností způsobeno, nastavením magnetů, které nebyly ve vodorovné poloze.

[37]

7. Závěr

Tato práce se zabývá destabilizací volné hladiny magnetické kapaliny magnetickým polem. Magnetické kapaliny jsou disperzním systémem nanočástic, jehož popis je uveden v teoretické části práce.

Destabilizace vodivých kapalin elektrostatickým polem je využívána při elektrostatickém zvlákňování. K popisu destabilizace jsou použity vztahy z elektrostatiky a mechaniky kapalin. U magnetických kapalin se pro destabilizaci jejich volné hladiny využívá pole magnetostatického.

Pro vytvoření magnetického pole byly v této práci, konkrétně v její experimentální části použity permanentní magnety. Použité permanentní magnety byly neodymové NdFeB. Neodymové magnety patří v současnosti mezi nejsilnější magnety. Pro udržení požadované vzdálenosti a možnost měnit vzdálenost mezi magnety byl navržen nástroj zajišťující polohu magnetů. Upnutím magnetů bylo vytvořeno magnetostatické pole, kterého byly postupně umísťovány jednotlivé kapaliny. Pozorovanými kapalinami byly polymerní disperze nanočástic železa, olejové disperze nanoželeza, a feromagnetické kapaliny. Hlavním rozdílem je, že částice ve feromagnetických kapalinách jsou stabilizované, na rozdíl od částic nanoželeza v polymerních a olejových disperzích.

Hladina polymerních částic nebyla destabilizována ani v jednom z prováděných experimentů. U polymerních disperzí docházelo po vložení do magnetického pole pouze k organizovanému pohybu částic. Hladina olejových disperzí byla destabilizována statickým magnetickým polem v případě vyšších koncentrací. V tomto případě byly vytvořeny kuželové hroty z kapaliny. U olejové disperze s nejnižší koncentrací byl zaznamenán také pouze pohyb částic disperzi, který byl dobře pozorován v uzavřené nádobě. Volná hladina feromagnetických kapalin byla destabilizována ve všech případech, ale pouze nesymetrickým magnetickým polem jednoho magnetu.

Destabilizaci magnetické kapaliny je velmi ovlivněna vzdáleností mezi magnety, protože jak bylo v práci uvedeno, síla působící mezi dvěma permanentními magnety velmi prudce klesá se zvyšující se vzdáleností mezi magnety. Mělo by být zajištěno rovnoběžné uložení magnetů, protože při měření magnetického pole bylo zjištěno, že nerovnoběžným uložení magnetů dojde k mírné deformaci magnetického pole a změnám magnetické

indukce v určitých bodech. Destabilizaci a chování částic v disperzi ovlivňuje stabilita nanočástic v disperzi, koncentrace nanočástic v disperzi. Další vlastností ovlivňující schopnost destabilizace bude patrně povrchové napětí a viskozita, právě díky těmto vlastnostem dochází k destabilizaci snadněji v kapalinách na olejové bázi. V případě použití dalšího magnetického pole dochází působením pole magnetostatického k utlumení pohybu částic způsobeném sekundárním magnetickým polem.

U olejových disperzí docházelo ke snadnějšímu formování hrotů kapaliny, vzdálenost potřebná ke změně velikosti hrotu byla velmi závislá na koncentraci. Feromagnetické kapaliny pod vlivem magnetického pole jednoho magnetu vytvářely kuželové úvary z okrajů Petriho misky směřující k okrajům magnetu. K takovému chování je nejspíš důsledkem zakřívování indukčních čar na okraji magnetu.

Zdroje

- [1] LUKÁŠ, David, *Fyzikální principy tvorby nanovláken*, Liberec, 2010
- [2] ROSENSWEIG, E. R. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge : Cambridge University press, 1997. 344 s.
- [3] YARIN, A. L.; ZUSSMAN, E. Upward needleless electrospinning of multiple nanofibers. *Polymer*. 2004, 45, s. 2977-2980.
- [4] _MAYER, Daniel. Magnetcké kapaliny a jejich použití : 1. část. *Elektro*. 2007, 3, s. 78-79.
- [5] RODRÍGUEZ, José A.; FERNANDÉZ-GARCÍA, Marcos . *Synthesis, properties and applicacion of oxide materials*. New Jersey : John Weily, 2007. 715 s.
- [6] BINNS, Cris. *Introduction to Nanoscience and Nanotechnology* . New Jersey : John Weily, 2010. 305 s.
- [7] HOŠEK, Jan. *Úvod do nanotechnologie*. Praha : České vysoké učení technické, 2010. 170 s.
- [8] KUBÁTOVÁ, J., et al. *Nanotechnologie*, sborník přednášek 2007/2008
- [9] TASAKALAKOS, Thomas ; OVID'KO, Ilya A.; VASUDEVAN, Asuri K. *Nanostructures: synthesis, functional properties and applications*. Dordecht : Kluwer Academic publisher, 2003. 694 s.
- [10] HOSOKAWA, Masuo, et al. *Nanoparticle Technology Handbook* . Amsterdam : Elsevier, 207. 620 s.
- [11] EXNAR, *Chemie povrchů*, Liberec, 2010
- [12] BARTOVSKÁ, Ludmila; ŠÍŠKOVÁ, Marie . *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Praha : VŠCHT, 2005. 244 s.
- [13] POUCHLÝ, Julius . *Fyzikální chemiemolekulárních a koloidních soustav*. Praha : VŠCHT, 2008. 205 s.
- [14] CASULA, Maria F., et al. Design of water-based ferrofluids as contrast agents for magnetic resonance imaging . *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011, 357, s. 50-55.
- [15] PARDOE, Heath, et al. Structural and magnetic properties of nanoscale iron oxide particles synthesized next term in the previous term presence of dextran or polyvinyl alcohol next term . *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, 225, s. 41-46.

- [16] LUKÁŠ, David, *Fyzikální principy tvorby nanovláken*, text k přednášce. Liberec
- [17] SVOBODA, E., et al. *Přehled středoškolské fyziky*. Praha : Prometheus, 2003. 497 s.
- [18] VYBÍRAL, Bohumil. *Elektrostatika : Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku*. 2004. s. 63. Dostupné z WWW: <<http://fo.cuni.cz/texty/elstat.pdf>>
- [19] FEYNMAN, Richard P.; LIEGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew . *Feynmanovy přednášky z fyziky 2*. Havlíčkův Brod : Fragment, 2001. 806 s.
- [20] LUKÁŠ, David, et al. Physical principles of electrospinning (Electrospinning as nano-scale technology of the twenty-first century). *Textile Progress*. 2009, 41, s. 59-140..
- [21] SEDLÁK, Bedřich; ŠTOL, Ivan. *Elektrina a magnetismus*. Praha : Academia, 2002. 632 s.
- [22] *Elektrodynamik* [online]. Jena : Universität Jena, 2007 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <http://www.physik-jena.de/login/skripte/skripte/skript_theoretischeelektrodynamik_ws0607_profdrandreaswipf_.pdf>.
- [23] JEŽEK, Jan ; VÁRADIOVÁ, Blanka; ADAMEC, Josef. *Mechanika tekutin*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2000. 150 s.
- [24] LUKÁŠ, David, *Elektrohydrodynamika*, Liberec, 2010
- [25] BRDIČKA, Miroslav ; SAMEK, Ladislav; SOPKO, Bruno. *Mechanika kontinua*. Praha : Academia, 2000. 799 s.
- [26] LANDAU, L.D. ; LIFSHITZ, E.M. *Fluid Mechanics*. Oxford : Pergamon press, 1986. 539 s.
- [27] RAMAKRISHNA, Seeram, et al. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. New Jersey : World Scientific, 2005. 382 s.
- [28] RENNEKER, Darrell H.; YARIN, Alexander. Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*. 2008, 49, s. 2387-2425.
- [29] TAYLOR, G. F., *Math. Phys. Sci.* 280, 1964, p. 383
- [30] LUKÁŠ, David, et al. Characteristic hydrodynamic time of electrospinning.. Inpress, .
- [31] landau CM
- [32] ČERNÝ, Ondřej . *Výzkum perspektivních metod mikroprocesorového řízení pro trakční synchronní motor s permanentními magnety.*, 2009. 95 s. Dizertační práce.

- UNIVERZITA PARDUBICE. Dostupné z WWW:
<https://dspace.upce.cz:8443/bitstream/10195/37242/1/Disertacni_prace_Ing_Cerny.pdf>.
- [33] CAMPBELL, Peter. *Permanent magnet materials and their application*. Cambridge : Cambridge University press, 1994. 207 s.
- [34] VOKOUN, David, et al. Magnetostatic interactions and force between cylindrical permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009, 321, s. 3758-3763.
- [35] ERHART, J., ŠIMEK, L. *Měření dipólového momentu (magnetické polarizace) permanentních magnetů, Návodů na cvičení*, 2010, Liberec
- [S] *KJ magnetics* [online]. 2011 [cit. 2011-05-20]. KJ magnetics. Dostupné z WWW: <<http://www.kjmagnetics.com/>>.
- [U] NOVÁK, Miroslav, et al. Measuring Low Magnetic Field in Electromagnetic Flow Meter, 2., .Inpress.