
Katarina Ninković i Sanja Milosavljević

Ispitivanje uticaja magnetnog polja na propagaciju ultrazvuka kroz magnetne fluide

Posmatrana je promena amplitude ultrazvuka frekvencije reda veličine kiloherca prilikom propagacije u fero i magnetoreološkim fluidima (tzv. magnetni fluidi). U prvom delu eksperimenta varirano je rastojanje magneta od ultrazučnih transduktora. Primećen je porast amplitude ultrazvuka prilikom unošenja oba tipa smeša u magnetno polje. Kod ferofluida je zapažen nagli maksimum, što se slaže s pretpostavkom da do najvećeg pojačanja dolazi kada je najveći broj čestica orijentisan duž pravca magnetnog polja. Urađen je i model profila magnetnog polja, koji dodatno objašnjava dobijene rezultate. U drugom delu eksperimenta posmatrana je zavisnost amplitude ultrazvuka u odnosu na vreme koje su magnetni fluidi proveli u magnetnom polju, kao i pojava histerezisa. Pokazano je da se amplituda povećava i sa vremenom, pošto se čestice raspoređuju paralelno sa pravcem delovanja magnetnog polja, dostižući zasićenje. U oba dela eksperimenta magnetno polje se prostiralo u pravcu normalnom na pravac prostiranja ultrazvuka, a merenja su urađena i sa jednim i sa dva magneta.

Teorijski uvod

Magnetni fluidi

Još sredinom prošlog veka postojalo je veliko interesovanje za primenu magnetnih suspenzija, odnosno za sintezu tzv. tečnog magneta. Prvi značajni uspeh u tome imao je Stiven Papel (Papell 1965), koji je, radeći u NASA-i, napravio raketno gorivo koje je moglo da se kontroliše putem magnetnog polja. Ubrzo nakon toga, slične suspenzije poprimaju naziv ferofluidi, i bivaju dalje proučavane i razvijane (Rosensweig 2014).

Ferofluidi (FF) predstavljaju koloidne rastvore fero- ili ferimagneta reda veličine nanometra u tzv. nosećem fluidu, najčešće vodi ili organskom rastvaraču. Koloidni rastvori su oni koji u sebi sadrže čestice koje imaju veliku molekulsku masu i koji su uglavnom stabilni i heterogeni. Feromagnetici su čestice (metali) koji pod uticajem spoljašnjeg magnetnog polja i

*Katarina Ninković
(2001), Beograd,
učenica 3. razreda
XIII beogradske
gimnazije*

*Sanja Milosavljević
(2001), Beograd,
učenica 3. razreda VI
beogradske gimnazije*

*MENTOR: Stefan Ilić,
master student
Elektronskog fakulteta
Univerziteta u Nišu*

sami postaju magneti. Svaka čestica je prekrivena surfaktantom, supstancicom koja smanjuje površinski napon između dve supstance (u ovom slučaju feromagneta i okružujuće tečnosti). Surfaktant inhibira pravljenje većih aglomerata (gromuljica) čestica magneta, jer su privlačne Van der Valsove sile unutar surfaktanta jače od magnetnog privlačenja feromagnetika (Voit *et al.* 2011; Wang *et al.* 2013; Scherer i Figueiredo Neto 2005).

Za razliku od FF, magnetoreološki fluidi (MR fluidi) su magnetni fluidi koje čine čestice veličine mikrometra i čija je gustina veća od gustine okolne supstance, što je uzrok taloženja ovih čestica. Nasuprot njima, ferofluidi ispoljavaju Braunovsko kretanje, što sprečava da se natalože, pošto su u stalnom haotičnom kretanju i sudaranju s okolnim česticama (Vicente *et al.* 2011; Scherer i Figueiredo Neto 2005).

Postoji veliki broj različih tipova magnetnih fluida, jer surfaktanti i noseće tečnosti variraju po tipu u zavisnosti od primene smeše, kako u nauci tako i u industriji. U medicini se sve više koriste kao lekoviti agensi prilikom hipertermije, odslikavanja, dopremanja lekova. U auto-industriji se koriste za dizajn kočnica, a u audio-industriji tokom proizvodnje zvučnika (Scherer i Figueiredo Neto 2005).

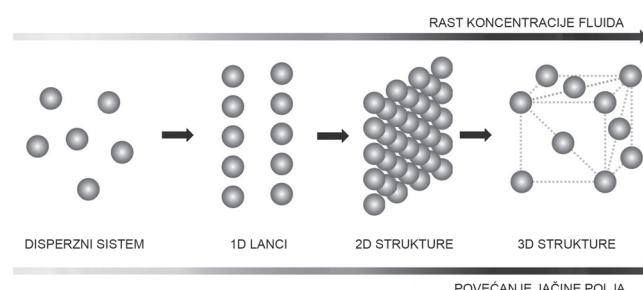
Magnetni fluidi u magnetnom polju

Bez delovanja magnetnog polja, magnetni fluidi se ponašaju kao izotropne tečnosti (obični disperzni sistemi), dok, pri delovanju magnetnog polja, gotovo da nastaje čvrsta sredina. Nakon što se ovi fluidi izvade iz magnetnog polja, do određene mere zadržavaju namagnetisanost (feromagnetizam). Shodno veličini čestica, ova pojava je izraženija kod MR fluida (Wang *et al.* 2013; Scherer i Figueiredo Neto 2005; Rodriguez-López *et al.* 2013).

U magnetnim fluidima svaka čestica ima svoj magnetni moment:

$$m_p = M_p \times V$$

gde je m_p magnetni moment, M_p magnetna saturacija, a V zapremina čestice (Shliomis *et al.* 2008). Nakon delovanja magnetnog polja, dolazi do orientacije ovih magnetnih momenata, pa zbog toga i do prostorne orientacije magnetnih čestica u pravcu delovanja magnetnog polja (slika 1), i posledično, promene viskoznosti smeše.



Slika 1. Struktura čestica u magnetnim fluidima pri uticaju magnetnog polja (preuzeto iz: Wang *et al.* 2013)

Figure 1. Magnetic fluids' particle structure in magnetic field (taken from: Wang *et al.* 2013)

Čestice se i u FF i u MR-fluidima smatraju za jednodomenske, ali se u MR-fluidima stvaraju veći aglomerati, shodno veličini čestica (Wang *et al.* 2013). Samim tim se viskoznost u MR-fluidima povećava više nego što je to slučaj kod FF-a.

Akustična svojstva magnetnih fluida

Na osnovu toga kakva je sredina kroz koju se prostire, svojstva zvuka, kao što je amplituda, čija je promena i posmatrana u ovom radu, znatno variraju i nose informacije o strukturi sredine. Postoji tri razloga zbog kojih dolazi do izmene karakteristika zvuka koji se prostire unutar nekog sistema. To su: difrakcija akustičnog talasa, atenuacija sredine (apsorbacija i rasejanje) i odbijanje zbog neslaganja akustičnih impedansi na kontaktu dve različite supstance (u ovom slučaju noseće tečnosti i magnetnih čestica). Atenuacija sredine je primarni izvor promene karakteristika zvuka, dok se ostali uticaji uglavnom zanemaruju (Rodriguez-López *et al.* 2013).

Ultrazvuk se, kao i magnetni fluidi, sve više koristi u medicini, a njegove osobine prilikom propagacije kroz ove smeše su sve više proučavane, što zbog analize samih magnetnih fluida, što zbog dalje primene. Do sada su se istraživanja bavila karakterizacijom ultrazvuka frekvenci reda veličine megaherca (Shliomis *et al.* 2008; Rodriguez-López *et al.* 2012), bilo u FF (Józefczak 2005), ili u MR fluidima (Rodriguez-López *et al.* 2013). Primećeno je da se amplituda ultrazvuka smanjuje kada se pravci magnetnog polja i ultrazvučne propagacije poklapaju. Situacija je obrnuta kada je magnetno polje normalno na propagaciju ultrazvuka – tada se amplituda povećava. Intenzitet pojačanja, odnosno smanjenja ovih parametara zavisi, kako od jačine i vrste magnetnog polja (Rodriguez-López *et al.* 2012), tako i od tipa smeše, frekvencije ultrazvuka (Shliomis *et al.* 2008) i vremena izloženosti smeše magnetnom polju (Rodriguez-López *et al.* 2012).

Cilj našeg istraživanja je analiza prostiranja ultrazvuka frekvencije reda veličine kiloherca unutar magnetnih fluida pod dejstvom magnetnog polja, imajući u vidu da se u medicini i srodnim oblastima često koriste te frekvence, a koje do sada nisu istraživane. Takođe izveštavamo o eksperimentu koji do sada, koliko je poznato autorima, nije rađen, tj. posmatranje promene amplitude u zavisnosti od rastojanja magneta i transduktora.

Eksperiment

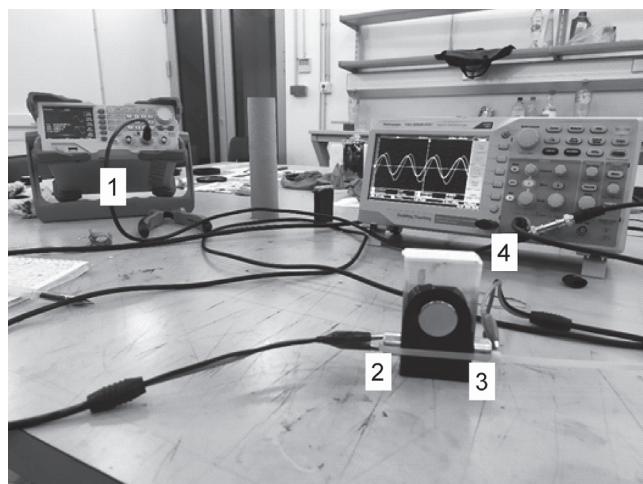
Aparatura

Eksperimentalna postavka ovog eksperimenta sastojala se od signal generatora Rigol DG1022Z, piezoelektričnih transduktora (predajnika i prijemnika) frekvencije 40 kHz, osciloskopa Tektronix TBS1052B-EDU, posude od tik-tak bombona, magnetnih fluida i magneta, što se može videti na slici 2. Visina transduktora iznosila je 25 mm, a prečnik 15 mm. Posude su bile spoljašnjih dimenzija $20 \times 47 \times 82$ mm, a unutrašnjih $17 \times 45 \times 80$ mm.

Zapremina i FF i MR fluida iznosila je 40.5 mL. Za merenje rastojanja magneta i dimenzija aparature korišćen je nonijus.

Magneti su bili diskoidnog oblika, širine 5 mm i prečnika 25 mm, šifre materijala N35 i jačine 1.17 T. Šifra materijala i jačina magneta su ustavljeni na osnovu podataka dobijenih od strane dobavljača (GAUS Group, Požarevac). Zarad pouzdanijih rezultata, potrebno je magnetometrom provjeriti jačinu magnetnog polja.

Signalni generator bio je povezan sa jednim transduktorom (predajnikom) koji je propuštao zvuk kroz posudu, dok se drugi transduktor (prijemnik) nalazio na drugoj strani posude. Prijemnik je bio povezan sa osciloskopom, na čijem se ulazu nalazio BNC T-spliter, kako bi se smanjio šum. Drugim kanalom, osciloskop je bio povezan sa signalnim generatorm. Kako osciloskop poseduje i ulaz za USB, čuvali smo podatke prilikom svakog merenja, nakon što bi se amplituda stabilizovala (obično nekoliko sekundi). Beleženi su i podaci o vrednosti amplitude pre unosa u magnetno polje (početne amplitude).



Slika 2. Eksperimentalna postavka – signalni generator (1), transdуктори: predajnik (2) и пријемник (3) и осцилоскоп (4)

Figure 2. Experiment setup – signal generator (1), transducer: transmitter (2) and receiver (3) and oscilloscope (4)

Priprema magnetnih fluida

Ferofluid je komercijalne proizvodnje (Edmund Scientific), a magnetoreološki fluid je napravljen mešanjem sojinog ulja i tonera, u odnosu 1 gram tonera na 1 mL ulja. Toner se sastoji od mikro fero-čestica i jedan je od ekonomičnijih načina proizvodnje MR fluida (Mesquida i Lassig 2014). Moguće je koristiti i druga ulja, kao što su suncokretovo ili motorno.

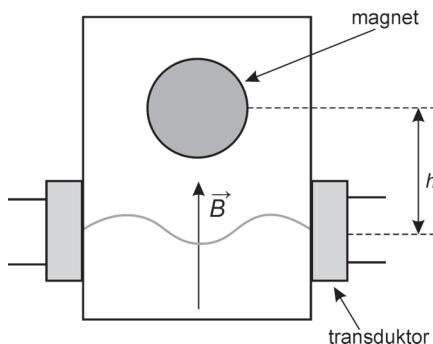
Kao što je spomenuto, stabilnost MR fluida je relativno mala i zavisi od njihove sinteze. Iako je mešanje tonera i ulja jedan od jednostavnijih pristupa sinteze, stabilnost ove smeše je već nakon nekoliko sati opadala, zbog čega su se izdvajali slojevi u smeši. Stoga je bilo potrebno dobro promešati MR fluid kako bi se čestice ponovo dispergovale. Najefikasniji način za ovo bio je da se čestice ubace u ultrazvučno kupatilo.

Postavke eksperimenta

Postavka je bila različita za merenja sa ferofluidom i MR fluidom. Na slici 3 prikazana je postavka korišćena pri merenjima sa ferofluidima (varijanta A), a na slici 4 postavka koja je korišćena pri merenjima sa MR fluidima (varijanta B). Ovakav pristup smo izabrali zato što je MR fluid jako heterogen, velike je gustine i lako se taloži, pa u varijanti A signal kroz ovaj fluid nije bio detektovan. Potrebna su dalja istaživanja za ferofluid i postavku varijante B, kako bi se dodatno ispitao ultrazvuk i tako uporedio sa MR fluidima.

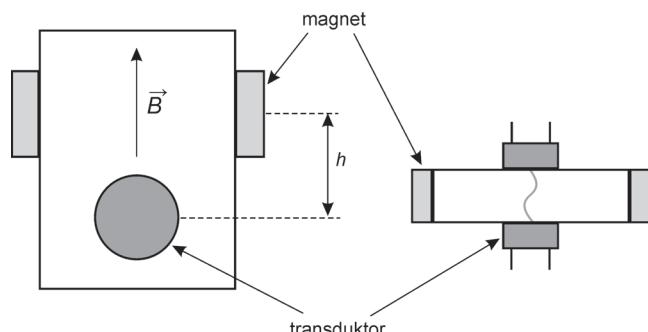
Merenja su izvođena sa jednim i sa dva magneta. Na slikama 3 i 4 su prikazane postavke u slučajevima u kojima su korišćena dva magneta, a po istom principu su realizovane i postavke sa jednim magnetom.

Pri svim merenjima pravac magnetnog polja je bio normalan na pravac prostiranja ultrazvuka.



Slika 3. Grafički prikaz eksperimentalne postavke za ferofluide (varijanta A)

Figure 3. Schematic diagram of the experimental setup for ferrofluids (variant A)



Slika 4. Grafički prikaz eksperimentalne postavke za MR fluide (varijanta B)

Figure 4. Schematic diagram of the experimental setup for MR fluids (variant B)

Pošto magnetne čestice u izvesnoj meri ostaju namagnetisane i nakon ukljanjenja fluida iz magnetnog polja, bilo je potrebno promešati magnetni fluid pre svakog ciklusa merenja. Takođe, proveravano je da li se vrednosti amplitudе ultrazvuka menjaju u praznoj posudi, u slučajevima sa i bez magnetnog polja, u zavisnosti od postavke, proteklog vremena i rastojanja

magneta od transduktera. Ispitano je i da li se amplituda menja u magnetnim fluidima bez prisustva magnetnog polja. Ni u jednom od navedenih slučajeva nije dolazilo do promene amplitude.

U obe varijante eksperimenta, i sa jednim i sa dva magneta, merene su amplitude ultrazvuka prilikom podizanja magneta, tj. posmatrana je zavisnost amplitude od rastojanja h između magneta i transduktera (pri čemu je to rastojanje uvek mereno u odnosu na njihove centre, odnosno ose, v. slike 3 i 4), kao i promene amplitude sa vremenom, tj. posmatrana je zavisnost amplitude od vremena izloženosti fluida magnetnom polju.

S obzirom na jaku privlačnu silu između fluida i magneta, kao i između samih magneta, prilikom merenja zavisnosti amplitude od udaljenosti magneta i transduktora, magneti su sve vreme stajali na posudi sa uzorkom. Magneti su pomerani istovremenim ravnometernim povlačenjem po zidu posude, tako da su su tokom celog toka merenja njihovi centri ostajali na istoj pravoj. Prilikom ovih merenja neposredno je beleženo rastojanje od vrha posude do vrha magneta, a na osnovu njega je računata udaljenost h između ose magneta i ose transduktora. Svaki ciklus merenja počinjao bi sa približno istom razdaljinom magneta od dna posude (≈ 33 mm), kako bi se donja granica magneta poklopila sa ravni gornje granice transduktora.

Promene amplitude zvuka u zavisnosti od vremena izloženosti fluida magnetnom polju magneta merene su tako što bi nakon merenja amplitude bez magnetnog polja, istovremeno postavili magnete (odnosno magnet) na sredinu posude, i ostavili ih na toj poziciji tokom celog ciklusa ovih merenja.

Greške intenziteta amplituda procenjene su kao absolutna vrednost razlike vrednosti amplitude očitane sa osciloskopa za dato merenje i odgovarajuće vrednosti amplitude nakon puštanja digitalnog filtera u programu Octave. Za grešku merenja rastojanja između transduktora magneta uzet je najmanji podeok mernog instrumenta, u ovom slučaju nonijusa.

Simulacija

Dodatna obrada je urađena u programu ParaView, u cilju lakšeg daljeg prikazivanja vektora polja.

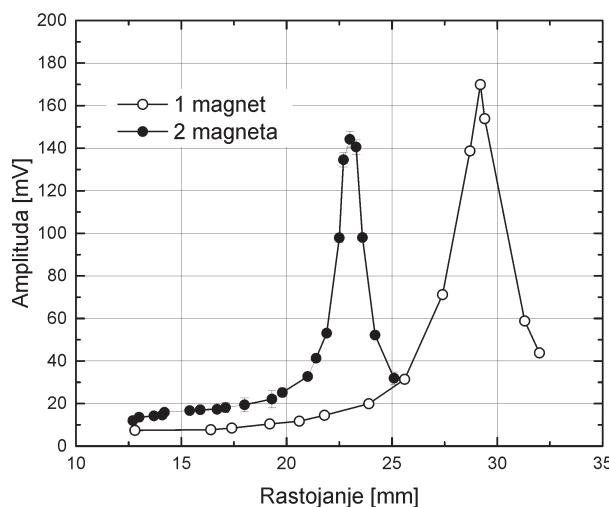
U programu Comsol urađena je simulacija magnetnog polja prisutnog u eksperimentu, zarad dodatnog pojašnjena fenomena i rezultata. Definisane su dimenzije i materijali magneta i posude, temperatura, relativna magnetna permeabilnost, kao i jačina magneta, a sam Comsol na osnovu datih parametara izračunava indukciju i jačinu magnetnog polja, i pruža uvid u vektore magnetnog polja. Dimenzije magneta i posude sa ferofluidom u simulaciji se poklapaju sa eksperimentalnom postavkom. Jasno je da je magnetno polje u pitanju statičko, imajući vidu da su korišćeni stalni magneti. Napominjemo da je upotrebljena vrednost jačine magneta dobijena od strane dobavljača, a parametri relativne magnetne permeabilnosti neophodni za simulaciju su pronađeni u literaturi (Ivanov i Kuznetsova 2002).

Rezultati i diskusija

Merenja sa promenom rastojanja magneta

Ferofluid

Na slici 5 prikazana je promena amplitude ultrazvuka sa promenom rastojanja centra magneta od centra ravni transduktera. Primećuje se da, i sa jednim, i sa dva magneta dolazi do oštrog porasta i pada amplitude. Za merenje sa dva magneta, amplituda dostiže 144.0 ± 4.0 mV, na rastojanju od 23 ± 5 mm, dok za merenja s jednim magnetom ona dostiže 170.0 ± 4.0 mV, na rastojanju od 29 ± 5 mm.

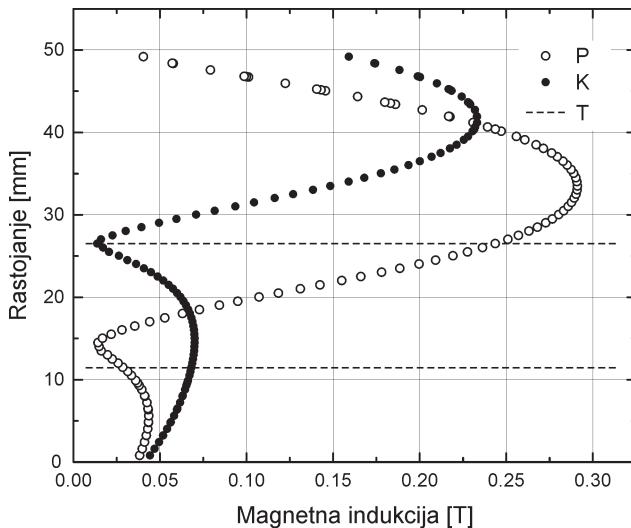


Slika 5. Zavisnost amplitude ultrazvuka od rastojanja magneta i transduktora u ferofluid

Figure 5. The dependence of the ultrasound amplitude upon the distance between the magnet and the transducers in ferrofluid

Na grafiku se moglo uočiti da je u odnosu na početno merenje amplitude bez magnetnog polja amplituda svakako veća (12.0 ± 0.4 mV za dva magneta, i 7.4 ± 1.8 mV za jedan magnet, u odnosu na početnu vrednost od 6.0 mV), što je u skladu sa prepostavkom da se odmah prilikom unosa u magnetno polje određeni deo čestica razmešta u lančane strukture.

Dva magneta. Zbog prisustva magnetnog polja fluid nema svuda istu gustinu, pa zato u njemu postoji centar oblasti sa najvećom gustom, odnosno najvećom koncentracijom feročestica. Taj centar se pomera sa promenom visine magneta. Međutim, pošto su ferofluidi jako viskozne tečnosti, njihov centar gustine se nalazi ispod ose magneta. Prilikom podizanja magneta duž zida posude, sve veći broj čestica postaje namagnetisan, a one, zbog same prirode feromagnetičnih čestica, zadržavaju tu namagnetisanost. Kako bivaju namagnetisane, sve više njih učestvuje u građenju unutrašnjih lanaca, centar gustine fluidnog medijuma je sve viši, zbog čega se i povećava amplituda ultrazvuka. Pojava da se amplituda povećava kada veći broj čestica izgrađuje unutrašnje lance primećena je u ranijim eksperimentima (Skumiel *et al.* 2003), kao što je primećeno i da veća koncentracija



Slika 6. Simulacija profila magnetnog polja u slučaju dva magneta pri početnom i krajnjem položaju

P – početni položaj

K – krajnji položaj

T – pozicija transduktora

Figure 6. The simulation of the profile of the magnetic field in the case with two magnets at the starting and the final position

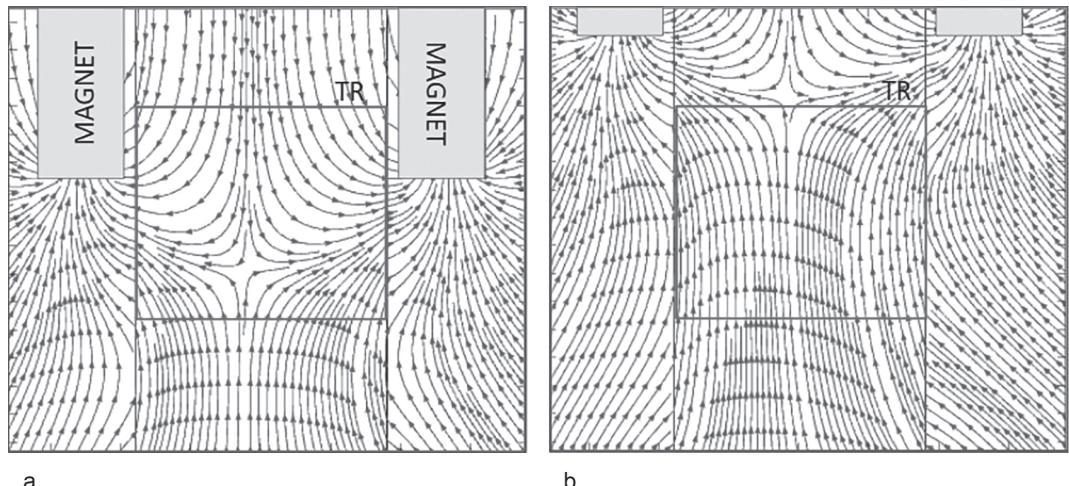
P – the starting position

K – the final position

T – the transducer position

fero-čestica има за последицу већи интензитет ултразвука (Rodriguez-López *et al.* 2013; Skumieli *et al.* 2003). У нашем експерименту, почетна амплитуда (без присуства магнетног поља) износила је 6.0 mV, а у празној посуди 5.6 mV.

На појаву максимума и намагнетисаности примарно утиче профил магнетног поља. Прilikom тумачења профила поља,битно је имати у виду његову јачину и оријентисаност вектора. Симулација (слика 6) је показала да, иако је максимална јачина магнетног поља мања прilikom достизања



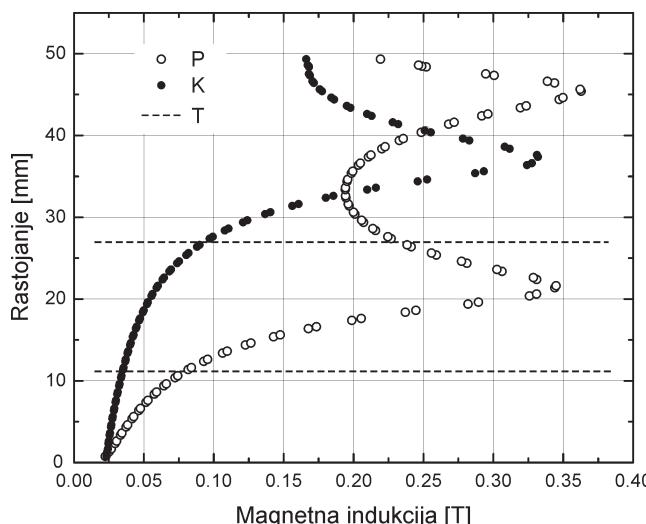
Slika 7. Вектори магнетног поља за ферофлуд у почетном (a) и крајњем (b) положају у случају два магнета

Figure 7. The magnetic field vectors in the ferrofluid at the starting position (a) and final position (b) for the case with two magnets

maksimuma amplitude nego u početnom položaju (0.07 T u finalnom položaju, naspram 0.24 T u početnom), amplituda raste, s obzirom na to da vektori magnetnog polja postaju paralelni u ravni gde se nalaze transduktori (slika 7b). Napominjemo da je na graficima profila (6, 8, 14, 16) isprekidanim linijama označena visina transduktora na posudi prilikom merenja. Kako vektori polja bivaju sve više paralelni, i same lančane strukture u ferofluidu postaju pravilnije organizovane, dostižući zasićenje.

Amplituda nakon ovog maksimuma, tj. daljim podizanjem magneta (nakon rastojanja od 23 ± 5 mm), opada (slika 5). Pretpostavljmo da, iako su lančane strukture sada pravilnije (slika 7b), jačina magnetnog polja nije dovoljna da ih zadrži u takvom položaju (slika 6). U tom slučaju, čestice bi tada napuštale lančane strukture, a sistem bi se vraćao u haotično stanje (Ivanov i Kuznetsova 2002; Rodriguez-López *et al.* 2012; Rodriguez-López *et al.* 2013; Skumielić *et al.* 2003).

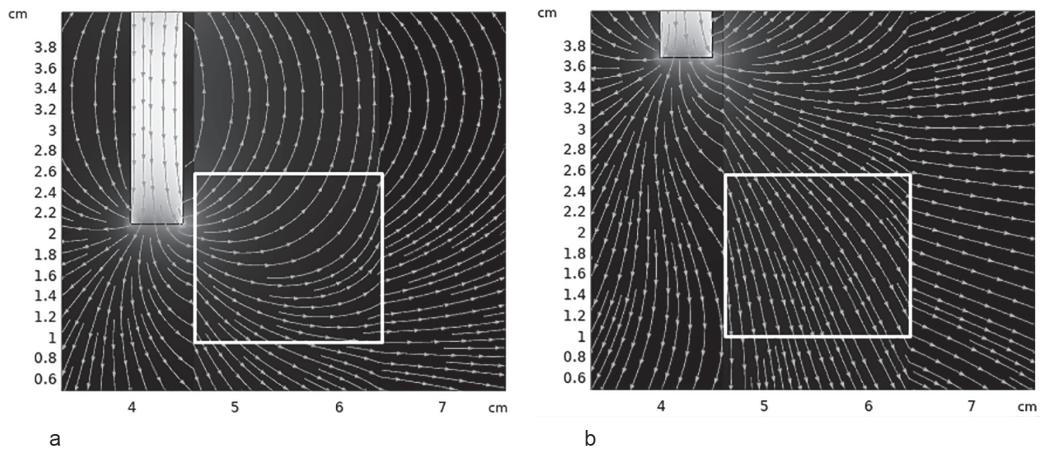
Jedan magnet. U slučaju jednog magneta, smatramo da zbog neravnomernog dejstva magnetnog polja, čestice bivaju privučene na onu stranu posude gde se nalazi magnet, što bi za posledicu imala pomeranje centra gustine sve više ka ivici. Kao što je to slučaj za dva magneta, prilikom podizanja magneta, jačina magnetnog polja opada u odnosu na početni položaj, odnosno 0.08 T u krajnjem položaju naspram 0.35 T u finalnom (slika 8).



Slika 8. Simulacija poređenja profila magnetnog polja (jedan magnet) pri početnom i krajnjem položaju
 P – početni položaj
 K – krajnji položaj
 T – pozicija transduktora

Figure 8. The simulation of the magnetic field profile (one magnet) at the starting and the final position
 P – the starting position
 K – the final position
 T – the transducer position

Kao i u slučaju dva magneta, vektori polja bivaju sve više paralelni kako se magnet podiže (slika 9), samo što se sada dobija veća amplituda ultrazvuka (170 mV naspram 144 mV, slika 5). Pretpostavka je da je zbog manje homogenosti magnetnog polja u slučaju jednog magneta potrebno veće izdizanje magneta, kako bi se centar gustine ferofluida našao unutar domena transduktora, i time bio postignut najveći broj namagnetisanih čestica.



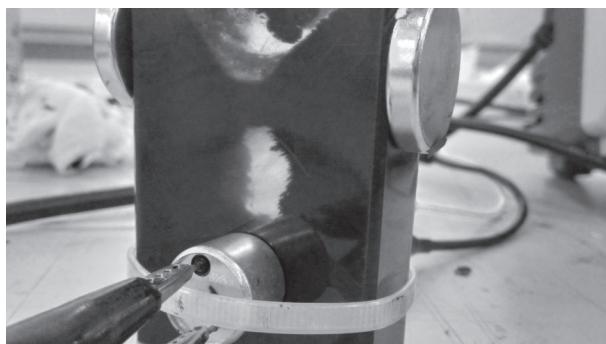
Slika 9. Vektori magnentog polja za ferofluid u početnom (a) i krajnjem (b) položaju u slučaju jednog magneta

Figure 9. The magnetic field vectors in the ferrofluid at the starting position (a) and final position (b) for the one magnet case

Magnetoreološki fluid

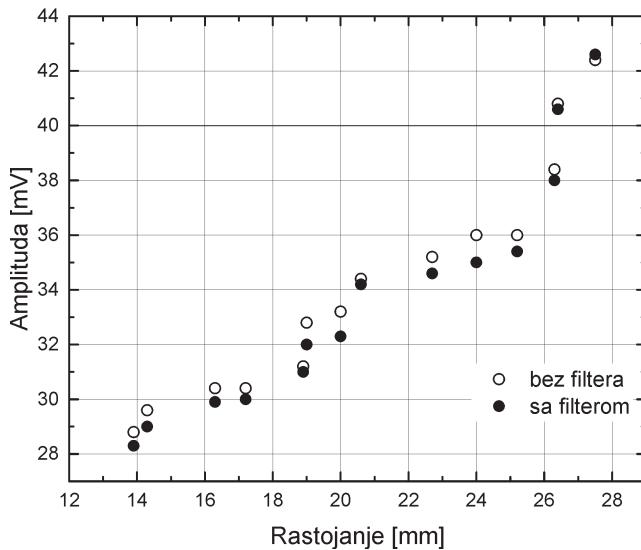
Na slikama 11 i 12 prikazana su merenja promene amplitude u zavisnosti od rastojanja magneta i transduktora za magnetoreološki fluid. Ne uočava se pojавa maksimuma, kao u slučaju s ferofluidom, već amplituda sve vreme raste sa pomeranjem magneta. Kada su u pitanju dva magneta (slika 11), merenja su rađena do momenta kada se fluid raslojio zbog dejstva magneta i loše sinteze. Taj momenat je prikazan na slici 10. Kod ovih merenja, amplituda bez dejstva magnetnog polja je iznosila 25.0 mV, a u praznoj posudi 9.6 mV.

Prilikom merenja s jednim magnetom ne dolazi do izdvajanja dva sloja zbog asimetričnog prostiranja vektora magnetnog polja kroz fluid, ali se takođe ne uočava ni konkretni maksimum (slika 12). Merenja su prekidana kada bi magnet povlačio fluid van posude. Iz ovih razloga, predlažemo da se detaljnija analiza MR fluida obavi sa većom posudom i boljom primenom fluida.



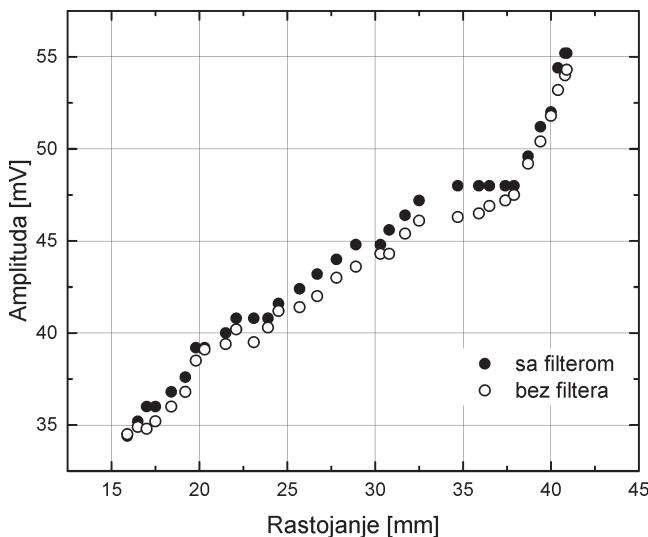
Slika 10. Trenutak raslojavanja MR fluida

Figure 10. The moment of MR fluid stratification



Slika 11. Zavisnost amplitude ultrazvuka od rastojanja magneta i transduktora za dva magneta u MR fluidu

Figure 11. The dependence of the ultrasound amplitude upon the distance between the magnet and the transducers, for two magnets in MR fluid (black circles – with filter, white circles – without filter)

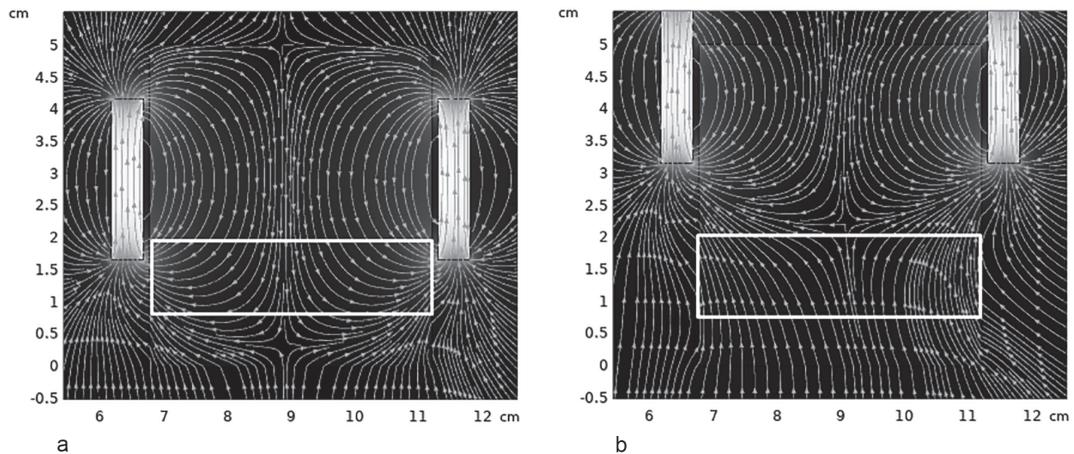


Slika 12. Zavisnost amplitude ultrazvuka od rastojanja magneta i transduktora za jedan magnet u MR fluidu

Figure 12. The dependence of the ultrasound amplitude upon the distance between the magnet and the transducers, for one magnet in MR fluid (black circles – with filter, white circles – without filter)

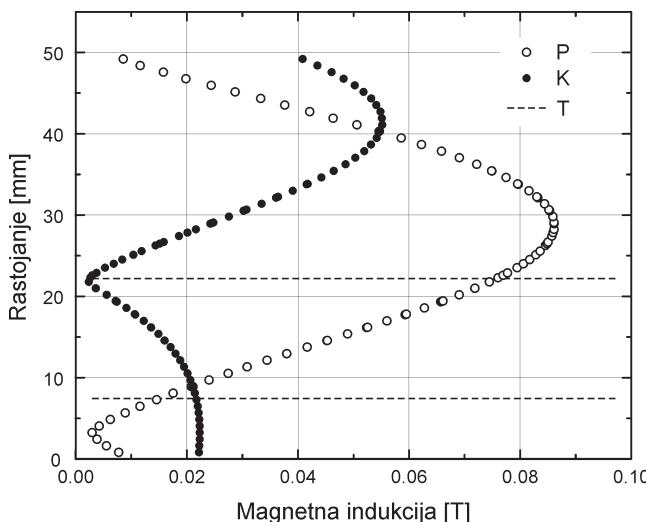
Dva magneta. Kao i u slučaju ferofluida, urađena je simulacija za eksperimentalnu postavku MR fluida (slika 14). Vektori magnetnog polja prikazani su na slici 13.

U slučaju dva magneta, uočavamo da pomeranjem magneta, kao što je to bio slučaj sa FF, vektori polja postaju paralelni (slika 13), dok jačina polja opada (slika 14). Maksimum indukcije prilikom krajnjeg položaja iznosi 0.022 T naspram 0.074 T u početnom položaju. Kako je magnetno polje jačine reda veličine 10^{-2} T tokom čitavog merenja, pojačanje amplitude ultrazvuka je primarno posledica većeg broja čestica unutar lančanih struktura. Prepostavlja se da do opadanja amplitute ne dolazi upravo zbog izraženih



Slika 13. Vektori magnentog polja za merenja sa dva magneta u MR fluidu pri početnom (a) i krajnjem (b) položaju

Figure 13. The magnetic field vectors for measurements with two magnets in MR fluid at the starting position (a) and final position (b) for the two magnets measurement

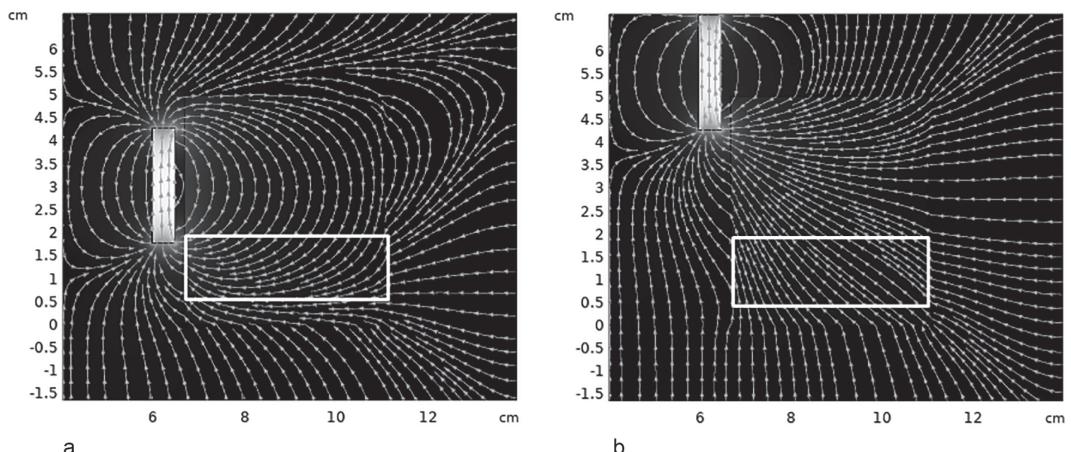


Slika 14. Simulacija profila magnetnog polja (dva magneta) u početnom i krajnjem položaju

Figure 14. The simulation of the magnetic field profile (two magnets) at starting and final positions

magnentnih osobima feročestica MR fluida, mada je potrebno ponoviti eksperiment s drugaćijom postavkom, zbog loše sinteze ovog fluida.

Jedan magnet. Analogno merenjima sa dva magneta u MR fluidu, pri podizanju magneta vektori magentnog polja postaju sve više paralelni (slika 15), dok maksimalna jačina magnetnog polja opada (slika 16). One iznose 0.05 T za krajnji i 0.27 T za početni položaj. Ponovo pretpostavljamo da dejstvom nejednakog magnetnog polja, dolazi do jačeg privlačenja MR fluida ka strani posude na kojoj se nalazi magnet.

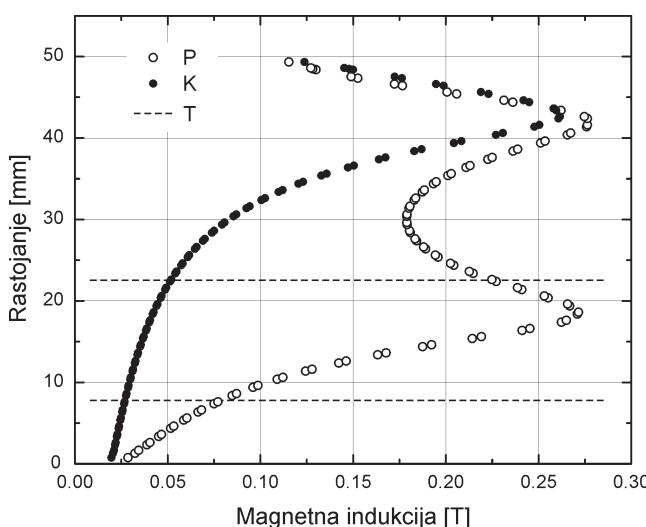


Slika 15. Vektori magnentog polja za merenja sa jednim magnetom u MR fluidu pri početnom (a) i krajnjem (b) položaju

Figure 15. The magnetic fields vectors for measurements with one magnet in MR fluid at the starting position (a) and final position (b) for the one magnet measurement

Jedan od razloga zašto ne dolazi do opadanja amplitude ultrazvuka može da bude to što se centar gustine MR fluida sve vreme nalazio na putanji ultrazvuka, odnosno u ravni sa transdukterima, kao i zbog izraženih magnetnih svojstava feročestica. Zbog toga predlažemo da se eksperiment ponovi s drugačijom postavkom.

Promene amplitude tokom vremena

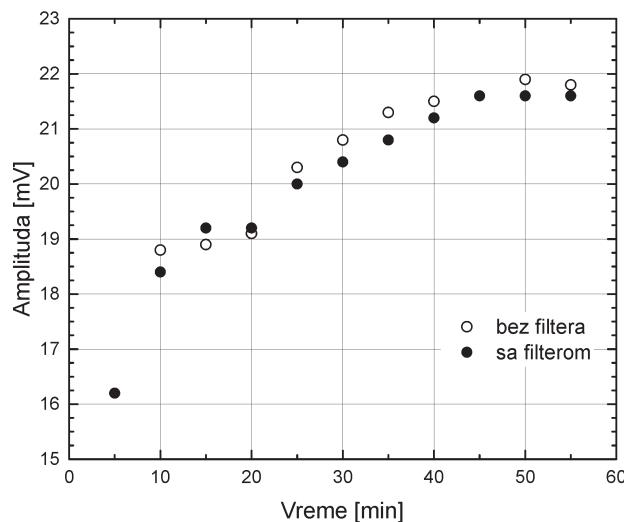


Slika 16. Simulacija poređenja profila magnetnog polja (jedan magnet) pri početnom i krajnjem položaju

Figure 16. The simulation of the magnetic field profile (one magnet) at starting and final positions

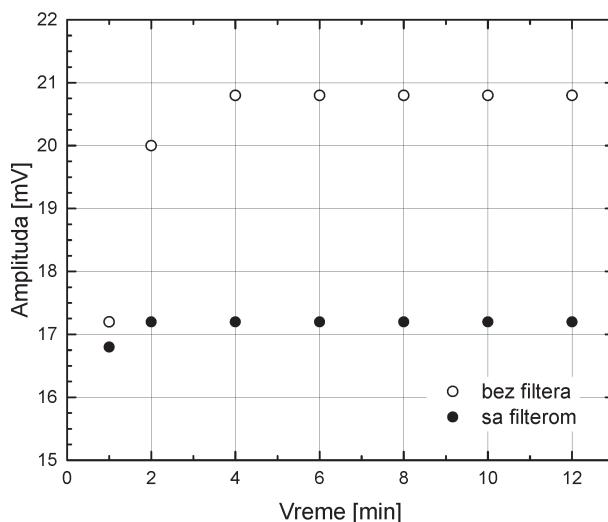
Kako vreme prolazi, čestice se raspoređuju u pravcu i smeru vektora magnetnog polja, pa tokom vremena ultrazvuk menja svoja svojstva. Amplituda se povećava sa vremenom, dok se čestice ne preraspodele, sve do momenta dok amplituda ne postane konstanta. Za razliku od merenja po rastojanju, ovde ne dolazi do pomeranja centra gustine fluida, pa je promena amplitude manja.

Ferofluid. Na slici 17 prikazana je promena amplitude ferofluida tokom vremena prilikom merenja sa dva magneta. Primećuje se porast amplituda, od početne vrednosti od 10.0 mV do vrednosti od 21.6 mV. Ova pojava se slaže s dosadašnjim radovima (Rodriguez-López *et al.* 2012), a dodatno ih potvrđuje profil magnetnog polja na slici 6, s obzirom da čestice



Slika 17. Promena amplitude tokom vremena u ferofluidu za dva magneta

Figure 17. Change of the amplitude over time in ferrofluid with two magnets (black circles – with filter, white circles – without filter)



Slika 18. Promena amplitude tokom vremena u ferofluidu za jedan magnet

Figure 18. Change of the amplitude over time in ferrofluid with one magnet (black circles – with filter, white circles – without filter)

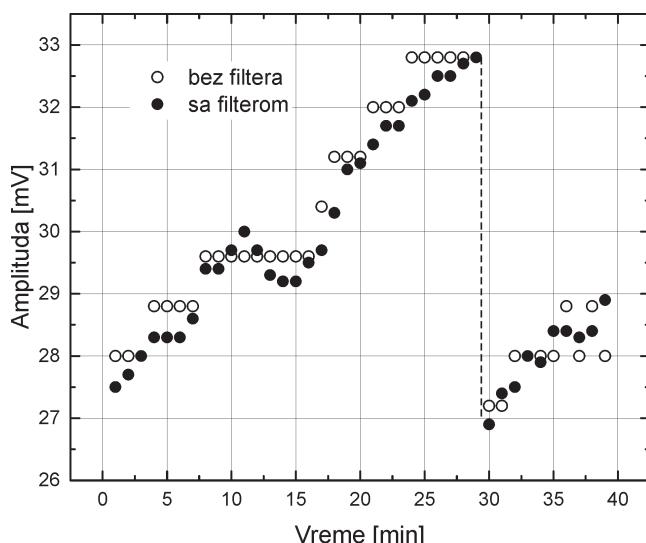
bivaju organizovane u unutrašnje strukture čim se unesu u magneno polje. Amplituda ultrazvuka u ovakvoj postavci, bez dejstva magnetnog polja je iznosila 10.0 mV.

Situacija sa jednim magnetom (slika 18) je slična, ali kako se magnet nalazi previše nisko da bi značajno izdigao čestice, i time veći broj čestica bio organizovan u pravilnije strukture, stabilizacija amplitude se postiže vrlo brzo postiže (već posle oko 3 minuta) u poređenju sa merenjima sa dva magneta (oko 40 minuta). Zbog veće uniformnosti polja sa dva magneta dolazi do većeg pojačanja, što se slaže sa drugim istraživanjima (Rodríguez-López *et al.* 2012).

Magnetoreološki fluid. Kod MR fluida se takođe uočava postepeno pojačanje amplitude i njena stabilizacija (slike 19 i 20). Prilikom merenja sa jednim magnetom (slika 19), nakon što se amplitude stabilisala u periodu od 24-28 minuta (maksimum iznosi 32.8 mV), sklonili smo magnet (označeno isprekidanom linijom), pri čemu se prepostavlja da je uočena pojавa histerezisnog efekta (na slici 19, vrednosti nakon isprekidane linije), tj. fenomen da, i nakon iznošenja iz magnentog polja, amplituda biva viša nego što je to bio slučaj pre unošenja u magnetno polje (Rodriguez-López *et al.* 2013).

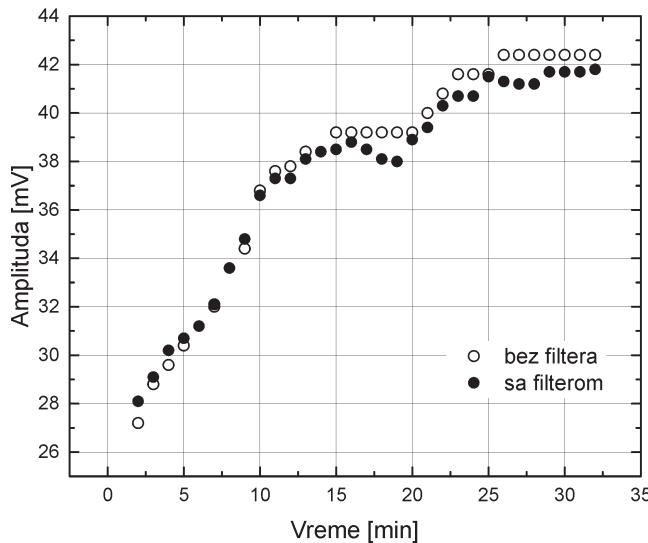
Kada je reč o merenjima s dva magneta (slika 20), maksimalna amplituda od 42.0 mV je postignuta u periodu od 28 minuta. Pojava da je maksimalna amplituda veća tokom merenja s dva magneta objašnjavamo kao i kod ferofluida, odnosno većom homogenošću polja i boljom organizacijom lančanih struktura (slika 13a naspram slike 15a).

Napominjemo da je amplituda ultrazvuka u obe postavke, bez dejstva magnetnog polja iznosila 25.0 mV.



Slika 19. Zavisnost amplitude ultrazvuka od vremena kod MR fluida, jedan magnet

Figure 19. Ultrasound amplitude with time correlation in MR fluid with one magnet
(black circles – with filter, white circles – without filter)



Slika 20. Zavisnost amplitude ultrazvuka od vremena kod MR fluida, dva magneta

Figure 20. Ultrasound amplitude with time correlation in MR fluid with two magnets
(black circles – with filter, white circles – without filter)

Zaključak

U ovom radu je istraživano kako na promenu amplitude ultrazvuka prilikom njegovog prostiranja kroz magnetoreološke i ferofluide utiču rastojanje magneta od transduktora, kao i proteklo vreme. U literaturi nisu pronađene informacije o istraživanjima u kojima su bile ispitivane frekvencije ultrazvuka reda veličine kiloherca, kao ni o istraživanjima u kojima je proučavan uticaj rastojanja magnetnog polja na pojačanje amplitute.

Na osnovu izvedenih eksperimenata, veće pojačanje amplitute je konstatovano prilikom promene rastojanja magneta i transduktora, nego prilikom merenja promene amplitude tokom vremena. U slučaju kada se posmatra promena amplitude od rastojanja između magneta i transduktora, sa povećanjem rastojanja, čestice bivaju sve više orijentisane u pravcu magnetnog polja. Prilikom merenja promene amplitude sa vremenom, do pojačanja amplitute dolazi zato što se čestice unutar fluida vremenom orijentisu u pravcu delovanja polja. Zanimljivo je da se u prvom slučaju, tj. u slučaju kada je posmatrana zavisnost promene amplitude sa rastojanjem, javlja maksimalna vrednost amplitute. Takođe, pretpostavlja se da je prilikom merenja sa jednim magnetom za magnetoreološke fluide, uočena pojava histerezisa.

Svojstvo da se jačina ultrazvuka može menjati, ako ne i podesiti, u zavisnosti od jačine polja, rastojanja izvora ultrazvuka od magneta i proteklog vremena, otvara brojne mogućnosti za dalju primenu.

Kako bi se podaci dobijeni u ovom eksperimentu upotpunili, bilo bi korisno da se simulira dinamika magnetoreoloških i ferofluida, kao i da se ponove opisana merenja sa drugačijom postavkom. U budućim istraživanjima predlažemo da se posmatra zavisnost promene vrednosti amplitute tokom vremena za više različitih visina magneta (za različita rastojanja

magneta od transduktora), kao i detaljnije analze pojave histerezisa kod magnetoreoloških fluida.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se, pre svega, našem mentoru, Stefanu Iliću, na izdvojenom vremenu i neprekidnoj podršci, kao i rukovodiocu seminara, Dušanu Drobnjaku, za svu nabavljenu opremu i za neograničeno strpljenje. Uspeh ovog projekta ne bi bio moguć bez doprinosa Dušana Petrovića, koji nam je rado ustupio svoj BNC T-spliter. I na kraju, zahvaljujemo se Vigoru Majiću, direktoru IS Petnica, na svoj pomoći prilikom istraživanja, a posebno na doniranom ferofluidu, bez kog ovaj rad ne bi ni postojao.

Literatura

- Ivanov A., Kuznetsova O. 2002. Magnetic properties of dense ferrofluids. *Journal of magnetism and magnetic materials*, **252**: 135.
- Józefczak A. 2005. Acoustic properties of PEG biocompatible magnetic fluid under perpendicular magnetic field. *Journal of magnetism and magnetic materials*, **293** (1): 240.
- Mesquida C. D., Lässig J. L. 2014. Characterization of simple magnetorheological fluids with potential application in engineering. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, **4** (3): 40.
- Papell S. S. 1965. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles. US Patent 3,215,572.
- Rodríguez-López J., Elvira Segura L., Montero de Espinosa Freijo F. 2012. Ultrasonic velocity and amplitude characterization of magnetorheological fluids under magnetic fields. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **324** (2): 222.
- Rodríguez-López J., Elvira Segura L., Montero de Espinosa Freijo F. 2013. Sound attenuation in magnetorheological fluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46** (6): 065001.
- Rosensweig R. E. 2014. *Ferrohydrodynamics*. Dover Publications
- Scherer C., Figueiredo Neto A. M. 2005. Ferrofluids: properties and applications. *Brazilian Journal of Physics*, **35** (3A): 718.
- Shliomis M., Mond M., Morozov K. I. 2008. Ultrasound attenuation in ferrofluids. *Physical Review Letters*, **101** (7): 074505.
- Skumił A. Jozefczak A., Hornowski T., Łabowski M. 2003. The influence of the concentration of ferroparticles in a ferrofluid on its magnetic and acoustic properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **36** (24): 3120.
- Vicente J., Klingenberg D. J., Hidalgo-Alvarez R. 2011. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*, **7**: 3701.
- Voit W., Kim D. K., Zapka W., Muhammed M., Rao K. V. 2011. Magnetic behavior of coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles in ferrofluids. *MRS Proceedings*, **676**: Y7.8.
- Wang M., He L., Yin Y. 2013. Magnetic field guided colloidal assembly. *Materials Today*, **16** (4): 110.

Katarina Ninković and Sanja Milosavljević

The Influence of a Magnetic Field on the Propagation of Ultrasound through Magnetic Fluids

An ultrasonic wave with a frequency of 40 kHz was studied during its propagation within ferro- and magnetorheological fluids, primarily focusing on the impact of the surrounding magnetic field on the ultrasonic amplitude. The first part of the experiment consisted of varying the distance between the magnets and the ultrasonic transducers. A rise in the ultrasonic amplitude was observed upon placing both of the aforementioned fluids into the magnetic field. In the case of ferrofluids, a sharp peak occurred, which correlates with the assumption that the greatest amplification is, on the one hand, the consequence of the most particles being oriented parallel to the lines of the magnetic field, and on the other, the result of the very presence of the magnetic field. As a further explanation of our results, we have created a model of the said magnetic field, demonstrating the distribution of the magnetic flux density. The second part of the experiment analyzed how the time spent within a magnetic field influenced the ultrasonic amplitude. We have shown that, with time, the amplitude increases, due to the organization of ferromagnetic particles along the lines of the magnetic field, reaching a saturation. Lastly, the hysteresis phenomena has been examined. In both parts of the study, the magnetic field was perpendicular to the propagation of the ultrasound, whilst measurements were carried out with both one and two magnets.

