

Michal Rajňák, Katarína Paulovičová, Milan Timko, Peter Kopčanský

Genéza a rozvoj výskumu magnetických kvapalín

Magnetické kvapaliny v súčasnosti predstavujú atraktívne progresívne materiály. Sú predmetom základného a aplikovaného výskumu na Slovensku aj v zahraničí. Využívajú sa už v niektorých technických zariadeniach, akými sú reproduktory či tlmiče. Tento príspevok stručne približuje genézu a rozvoj výskumu magnetických kvapalín a poskytuje prehľad vybraných vedeckých publikácií s danou problematikou.

Kľúčové slová: magnetická kvapalina, nanočastice, nanotechnológia

Magnetic fluids are currently attractive progressive materials. They are the subject of fundamental and applied research in Slovakia and abroad. They are already used in some technical equipment, such as loudspeakers or dampers. This contribution briefly approaches the genesis and development of magnetic fluid research and provides an overview of selected scientific publications on the given issue. (**The genesis and development of magnetic fluid research**)

Keywords: magnetic fluid, nanoparticles, nanotechnology

I. GENÉZA MAGNETICKÝCH KVAPLÍN

Nanokvapaliny, ktoré sú jedným z produktov sveta nanotechnológií, predstavujú suspenzie nanočastíc v bežných kvapalinách ako voda, oleje, glykol, organické rozpúšťadla, či iónové kvapaliny. Hlavným motívom ich prípravy je vylepšenie vlastností základnej kvapaliny regulovateľným rozptýlením nanočastíc v jej celom objeme. Na tento účel, podľa požadovaných vlastností nanokvapaliny, sa používajú nanočastice zo skupiny vzácnych kovov, polovodičov, magnetických materiálov, oxidov kovov, ale aj polymérne nanočastice [1]. V súčasnosti, vďaka bohatým históriám koloidnej vedy a nedávnym pokrokom v oblasti metód syntézy častíc, je možné vyrábať nanokvapaliny pre rapídne narastajúce množstvo aplikácií. V prvom rade ide o využitie nanokvapalín ako transportných médií, kde sa využívajú ich výrazne zlepšené termofyzikálne vlastnosti, akými sú najmä tepelná vodivosť, tepelná kapacita, konvekčný a kondukčný prenos tepla a iné [2]. Ďalšiu kategóriu aplikácií tvoria nanokvapaliny vo funkcii elektromagneticky aktívneho média. Rôznorodé využitie nanokvapalín v tejto oblasti pramení z možnosti výrazne meniť optické, magnetické a elektrické vlastnosti kvapalín, prostredníctvom pridávania malého množstva nanočastíc. Týmto spôsobom je možné vytvoriť nanokvapaliny, ktoré vykazujú silnú absorpciu, rozptyl alebo emisiu svetla určitých vlnových dĺžok, čo má potenciál pre využitie v optickej filtrácii [3] a získavaní solárnej energie [4].

Špeciálnym druhom nanokvapalín sú magnetické kvapaliny, tiež nazývané ferokvapaliny. Boli objavené už v štyridsiatych rokoch dvadsiateho storočia [5]. V počiatkoch však ferokvapaliny obsahovali feromagnetické častice mikrometrových rozmerov, čo pri väčšom množstve častíc umožňuje dosiahnuť značné zmeny reológických vlastností kvapalín [1]. Tieto tradičné magnetoreológické kvapaliny nachádzajú efektívne využitie najmä v mechanických a elektromechanických aplikáciách v podobe senzorov, motorov, tlmičov, tesnení, ložísk a bŕzd [6-8]. Vedecké práce zaoberajúce sa koloidnými disperziami s nanometrovými magnetickými časticami sa začali objavovať v šesťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia [6, 9, 10]. Odvtedy sa neustále vyvíjajú lepšie metódy prípravy magnetických nanočastíc z rôznych magnetických materiálov, ako aj spôsoby ich rozptylu a stabilizácie v rôznych nosných kvapalinách.

II. ROZVOJ VÝSKUMU MAGNETICKÝCH KVAPALÍN

Stabilné magnetické kvapaliny priťahujú čoraz väčší záujem biomedicínskeho výskumu [11, 12]. Ťažiskom ich aplikácií v tejto oblasti je najmä možnosť interakcie magnetickej kvapaliny s magnetickým poľom, ale aj dobré optické a tepelné vlastnosti. Odtiaľ pramenia významné aplikácie magnetických kvapalín pri liečbe rakoviny a riadení pohybu kvapalín. K dvom hlavným oblastiam výskumu liečby rakoviny využitím magnetických kvapalín patrí cieleň transport liečiv a hypertermia [13, 14]. Kľúčovou úlohou cieleň transportu je magnetickým poľom riadená doprava liečiva naviazaného vo ferokvapaline k rakovinovým bunkám. Princípom hypertermickej liečby je upevnenie magnetických nanočastíc k postihnutej oblasti, ktorá je následne vystavená striedavému magnetickému poľu alebo infračervenému žiareniu. Vďaka vysokej absorpcii magnetických nanočastíc bude dochádzať k ich ohrevu, čo zapríčini poškodenie rakovinových buniek (tepelné odstraňovanie) [15, 16].

Magnetické kvapaliny pripravované na báze dielektrických kvapalín, najmä transformátorových olejov, majú veľký aplikačný potenciál pre využitie v elektroenergetike, konkrétne vo výkonových transformátoroch. Hlavnou úlohou transformátorového oleja je poskytovať elektrickú izoláciu živých častí a sprostredkovať odvod tepla z vinutia a jadra transformátora. Teplo sa prenáša hlavne termokonvekciou oleja k chladičom, spôsobenou vertikálnym teplotným gradientom. V niektorých prípadoch ide o nútené prúdenie oleja pomocou čerpadiel. Pravdou však je, že vysoko rafinované minerálne oleje, bežne používané ako izolačné kvapaliny vo výkonových transformátoroch, majú nízku tepelnú vodivosť a zabezpečujú nízku chladiacu účinnosť [17]. Z vyššie spomenutého je už jasné, že tepelnú vodivosť oleja je možné vylepšiť pridanými nanočasticami. Navyše pridaním magnetických nanočastíc je možné zvýšiť chladiaci účinok aj prostredníctvom termomagnetickkej konvekcie, ktorá pramení z teplotne závislej magnetizácie nanočastíc, prítomnosti vonkajšieho magnetického poľa a teplotného gradientu [18].

Magnetické kvapaliny prekvapujúco vykazujú lepšie dielektrické vlastnosti v porovnaní s čistým transformátorovým

olejom. Prítomnosť nanočastíc v oleji zvyšuje najmä elektrickú pevnosť, ktorá je kľúčovou veličinou charakterizujúcou kvalitu dielektrika. Toto zistenie prvýkrát publikoval Segal [19] v roku 1998 a následne sa začali objavovať potvrdzujúce experimentálne štúdie rôznych magnetických kvapalín tak v zahraničí [20-23], ako aj na Slovensku [24-26]. V súčasnosti však existuje iba niekoľko teoretických modelov, ktoré vysvetľujú pôvod zvýšenej elektrickej pevnosti magnetických kvapalín [27-29]. Pri výskume magnetických kvapalín pre aplikácie v elektroenergetike je nutné okrem elektrickej pevnosti študovať aj ďalšie dielektrické vlastnosti a javy, a to čiastkové výboje, pred-prierné stavy a vývoj vodivých kanálov, permitivitu, stratový činiteľ a ich závislosti na objemovej koncentrácii nanočastíc, teplote, magnetickom poli a frekvencii elektrického poľa. V rámci komplexnej charakterizácie magnetických kvapalín predstavuje štúdium dielektrických veličín tiež vynikajúci nástroj na odhaľovanie štruktúrnych a dynamických vlastností. Ide najmä o frekvenčné závislosti permitivity a stratového činiteľa, ktorých priebehy dokážu odhaliť jednotlivé relaxačné procesy súvisiace s polarizáciou určitých komponentov magnetických kvapalín.

III. ZHRNUTIE A ZÁVER

Z uvedeného literárneho prieskumu je zrejme, že výskum magnetických kvapalín má obrovský potenciál a môže viesť k reálnym aplikáciám v rôznych odvetviach priemyslu 21. storočia. Magnetické kvapaliny pripravované na báze dielektrických kvapalín, najmä transformátorových olejov, majú veľký aplikačný potenciál pre využitie v elektroenergetike, konkrétne vo výkonových transformátoroch. O aktuálnej požiadavke výskumu takto nano-funkcionalizovaných olejov na Slovensku svedčí aj záujem výrobcu distribučných transformátorov BEZ Transformátory a.s., ktorý sa v roku 2023 stal odberateľom výsledkov výskumu APVV projektu: Nano-funkcionalizácia kvapalín pre olejové transformátory. Testy distribučných transformátorov s magnetickými kvapalinami tak budú predstavovať významný pokrok v rozvoji výskumu magnetických kvapalín na Slovensku.

POĎAKOVANIE

Táto práca bolo podporená Agentúrou na podporu vedy a výskumu v rámci projektu APVV-22-0115 a Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaM SR a SAV VEGA 2/0029/24 a NATO Science for Peace and Security Program G5683.

LITERATÚRA

- [1] R. Taylor, S. Coulombe, T. Otanicar, P. Phelan, A. Gunawan, W. Lv, G. Rosengarten, R. Prasher, and H. Tyagi, "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 1, pp. 011301–011301–19, Jan. 2013.
- [2] S. Özerinç, S. Kakaç, and A. G. Yazicioğlu, "Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 8, no. 2, pp. 145–170, Nov. 2009.
- [3] R. A. Taylor, T. Otanicar, and G. Rosengarten, "Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems," *Light Sci Appl*, vol. 1, no. 10, p. e34, Oct. 2012.
- [4] R. A. Taylor, P. E. Phelan, T. P. Otanicar, C. A. Walker, M. Nguyen, S. Trimble, and R. Prasher, "Applicability of nanofluids in high flux solar collectors," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 023104–023104–15, Apr. 2011.
- [5] W. M. Winslow, "Induced Fibration of Suspensions," *Journal of Applied Physics*, vol. 20, no. 12, pp. 1137–1140, Dec. 1949.
- [6] J. L. Neuringer and R. E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics," *Physics of Fluids*, vol. 7, no. 12, pp. 1927–1937, Dec. 1964.
- [7] K. Raj, B. Moskowicz, and R. Casciari, "Advances in ferrofluid technology," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 149, no. 1–2, pp. 174–180, Aug. 1995.
- [8] L. Vékás, D. Bica, and M. V. Avdeev, "Magnetic nanoparticles and concentrated magnetic nanofluids: Synthesis, properties and some applications," *China Particuology*, vol. 5, no. 1–2, pp. 43–49, Feb. 2007.
- [9] R. E. Rosensweig, "Buoyancy and Stable Levitation of a Magnetic Body immersed in a Magnetizable Fluid," *Nature*, vol. 210, no. 5036, pp. 613–614, May 1966.
- [10] R. Moskowicz and R. E. Rosensweig, "Nonmechanical torque-driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field," *Applied Physics Letters*, vol. 11, no. 10, pp. 301–303, Nov. 1967.
- [11] M. Ferrari, "Cancer nanotechnology: opportunities and challenges," *Nat. Rev. Cancer*, vol. 5, no. 3, pp. 161–171, Mar. 2005.
- [12] S. Nie, Y. Xing, G. J. Kim, and J. W. Simons, "Nanotechnology Applications in Cancer," *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 257–288, 2007.
- [13] T. M. Allen, "Ligand-targeted therapeutics in anticancer therapy," *Nat. Rev. Cancer*, vol. 2, no. 10, pp. 750–763, Oct. 2002.
- [14] J. W. Park, "Liposome-based drug delivery in breast cancer treatment," *Breast Cancer Research*, vol. 4, no. 3, p. 95, Apr. 2002.
- [15] M. Johannsen, B. Thiesen, P. Wust, and A. Jordan, "Magnetic nanoparticle hyperthermia for prostate cancer," *Int J Hyperthermia*, vol. 26, no. 8, pp. 790–795, 2010.
- [16] R. Hergt, S. Dutz, R. Müller, and M. Zeisberger, "Magnetic particle hyperthermia: nanoparticle magnetism and materials development for cancer therapy," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 18, no. 38, p. S2919, Sep. 2006.
- [17] H. G. Erdman, Ed., *Electrical Insulating Oils*. American Society for Testing & Materials, 1988.
- [18] C. L. Altan, A. Elkatmis, M. Yuksel, N. Aslan, and S. Bucak, "Enhancement of thermal conductivity upon application of magnetic field to Fe3O4 nanofluids," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 9, Nov. 2011.
- [19] V. Segal, A. Hjortsberg, A. Rabinovich, D. Nattrass, and K. Raj, "AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles," in *Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1998*, 1998, vol. 2, pp. 619–622 vol.2.
- [20] V. Segal, A. Rabinovich, D. Nattrass, K. Raj, and A. Nunes, "Experimental study of magnetic colloidal fluids behavior in power transformers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 215–216, pp. 513–515, Jun. 2000.
- [21] J.-C. Lee and W.-Y. Kim, "Experimental Study on the Dielectric Breakdown Voltage of the Insulating Oil Mixed with Magnetic Nanoparticles," *Physics Procedia*, vol. 32, no. 0, pp. 327–334, 2012.
- [22] Y. Lv, L. Wang, X. Li, Y. Du, J. Zhou, and C. Li, *Experimental Investigation of Breakdown Strength of Mineral Oil-Based Nanofluids*. New York: Ieee, 2011.
- [23] J.-C. Lee, W.-H. Lee, S.-H. Lee, and S. Lee, "Positive and negative effects of dielectric breakdown in transformer oil based magnetic fluids," *Materials Research Bulletin*, vol. 47, no. 10, pp. 2984–2987, Oct. 2012.
- [24] F. Herchl, K. Marton, L. Tomčo, P. Kopčanský, M. Timko, M. Koneracká, and I. Kolcunová, "Breakdown and partial discharges in magnetic liquids," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 20, no. 20, p. 204110, May 2008.
- [25] J. Kudelčík, P. Bury, P. Kopcansky, and M. Timko, "Dielectric breakdown in mineral oil ITO 100 based magnetic fluid," *Physics Procedia*, vol. 9, pp. 78–81, 2010.
- [26] P. Kopčanský, M. Koneracká, M. Timko, I. Potočová, K. Marton, and L. Tomčo, "The Dielectric Breakdown Strength of Magnetic Fluids Based on Transformer Oil," *Czech J Phys*, vol. 54, no. 4, pp. 659–662, Dec. 2004.
- [27] J. G. Hwang, M. Zahn, F. M. O'Sullivan, L. A. A. Pettersson, O. Hjortstam, and R. Liu, "Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 1, Jan. 2010.
- [28] J.-W. G. Hwang, "Elucidating the mechanisms behind pre-breakdown phenomena in transformer oil systems," Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [29] J. G. Hwang, F. O'Sullivan, M. Zahn, O. Hjortstam, L. A. A. Pettersson, and R. Liu, "Modeling of Streamer Propagation in Transformer Oil-Based Nanofluids," in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008*, 2008, pp. 361–366.

ADRESY AUTOROV

Michal Rajňák, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice,
04001, Slovenská Republika, rajnak@saske.sk
Katarína Paulovičová, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47,
Košice, 04001, Slovenská Republika, paulovic@saske.sk

Milan Timko, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice,
04001, Slovenská Republika, timko@saske.sk
Peter Kopčanský, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, Košice,
04001, Slovenská Republika, kopcan@saske.sk