

А. В. Гільчук¹
 М. О. Голятка¹
 А. О. Кришталь¹

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ НАМАГНІЧУВАННЯ МАГНІТНОЇ РІДИНИ ЗА ДЕФОРМАЦІЄЮ КРАПЛІ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

¹Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Важливою особливістю магнітних рідин (МР) є топологічна нестабільність їх об'ємів, що мають вільну поверхню в магнітних полях (МП) (явище втрати їх цілісності за певних умов). Таке розщеплення краплі становить науковий та практичний інтерес. Розуміння механізму цього явища дозволить усунути або контролювати ці ефекти, що важливо для багатьох чутливих пристроїв. Мета дослідження — вирішення проблеми опису розщеплення краплі магнітної рідини, що лежить на горизонтальній твердій частково змочуваній гумовій підкладці, в магнітній області постійного магніту та експериментальне визначення типу залежності зміни висоти магнітної рідини в магнітному полі.

В Україні дослідження магнітних рідин проводяться в таких наукових організаціях, як Інститут ядерних досліджень, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського, Київський національний університет імені Тараса Шевченка та ін. Основною причиною розширення краплі в магнітному полі є переорієнтація магнітних доменів всередині нього. Намагніченість рідини починає зростати. Це створює тиск по осях в краплі, що змушує краплю розтягуватися і потім розщеплюватися. Експеримент проводився з трьома магнітними рідинами з різними компонентами. Отримані частки найімовірнішого розміру від $5,8 \pm 1,0$ нм до $8,7 \pm 1,0$ нм.

Проведено експеримент для визначення залежності геометричних параметрів крапель магнітної рідини від магнітного поля. Виміряно величину поля і висоту краплі. Експеримент проводився до досягнення максимального значення поля установки. Отримана залежність може характеризувати гістерезисну криву намагнічування магнітної рідини. Апроксимація проводилася на основі арктангенціальних функцій.

Досліджено умови розриву краплі магнітної рідини на твердій гумовій частинці немагнітної підложки в магнітному полі. Розглянуто кілька магнітних рідин різного складу. Запропоновано оптимальну фізико-математичну модель процесу. Отримано експериментальні залежності розриву напівобмеженої краплі магнітних рідин у магнітному полі, що відповідають моделі.

Ключові слова: магнітна рідина, магнітне поле, напівобмежена крапля, крива намагнічування.

Вступ

Стійкі колоїдні дисперсії однодомених наночасток феро- та феримагнітних матеріалів у несучій рідині, так звані магнітні рідини, поєднують у собі текучість та високу намагніченість. Частинки є мініатюрними постійними магнітами, що вкриті тонкою оболонкою ПАР для запобігання злипанню, та хаотично обертаються внаслідок теплового руху, який забезпечує стійкість розчину до розшарування. Зовнішнє МП орієнтує магнітні моменти частинок, що призводить до зміни магнітних, оптичних та реологічних властивостей розчину. На властивості також впливає утворення при великому значенні МП агрегатів часток, зумовлене міжчастинковою взаємодією.

Особливістю процесів намагнічування та перемагнічування МР є топологічна нестійкість (явище втрати цілісності) їх об'ємів у МП, що мають вільну поверхню (краплі, струмені). Розуміння механізму цього явища становить науковий та практичний інтерес. В роботі показано, що дослідження геометричних параметрів крапель МР у МП дозволяє будувати криві намагнічування МР. У техніці важливо мати можливість контролювати ці ефекти. Тому дослідження, результати яких

подані у роботі, направлені на розв'язання задачі опису поведінки краплі МР, що лежить на горизонтальній твердій частково змочуваній гумовій підкладинці у МП постійного магніту, встановлення прийнятності її вивчення для опису намагнічування МР.

Проблемами МР в Україні займаються: Інститут ядерних досліджень, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, КНУ ім. Шевченка, та інші наукові організації.

Задача про топологічну нестійкість напівобмеженої краплі магнітної рідини, що намагнічується, розв'язувалася у Білоруському національному технічному університеті [1], [2].

Актуальність теми. В останні роки активно ведеться використання магнітних властивостей МР у високотехнологічних пристроях та приладах: системах герметизації, високочутливих вимірювачах прискорень, мікроманометрах. Перспективне застосування МР у медицині як рентгеноконтрастної речовини, для направленої транспортування ліків, локальної гіпертермії. Намагнічування МР широко використовується у різноманітних галузях науки та техніки. Наприклад, у магнітних сепараторах та виконавчих механізмах роботів.

За допомогою визначення намагніченості МР можна отримувати відомості про «ефективні» розміри магнітних часток у несучій рідині, тобто такі розміри, які впливають на її магнітні властивості. Таким чином враховуються магнітні моменти агрегатів та мікрокластерів частинок, у тому числі й ланцюжкових, які залежать від напруженості зовнішнього магнітного поля. Така перевага є дуже важливою, оскільки їх спостереження в оптичному мікроскопі неможливе. Методи, які ґрунтуються на теоретичному підході, не враховують утворення інших фракцій кластерів, окрім ланцюжкових [3].

Опис фізики процесу

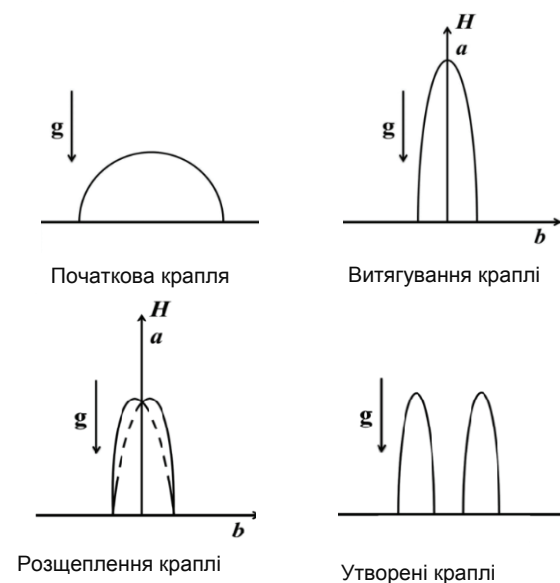


Рис. 1. Процес деформації краплі МР в МП

Повна енергія краплі, як замкненої системи, є постійною. Вона складається з гравітаційної (потенційної енергії центра мас краплі), енергії поверхневого натягу, та магнітної енергії. Під дією МП відбувається перерозподіл енергії всередині краплі.

У полі постійного магніту вільна поверхня МР розташовується якомога більш паралельно вектору напруженості, через те, що прагне прийняти форму, за якої мінімізуються можливі збурення МП. До розщеплення краплі має форму $f(r)$ (у Декартових координатах: $z = f(r)$; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$), що визначається рівнянням зміни тиску на границі вільної поверхні:

$$p_2^1 = 2\sigma K + \frac{1}{8\pi} [B_n H_n - \overline{B_\tau H_\tau}]_2^1, \quad (1)$$

де σ — коефіцієнт поверхневого натягу; K — середня кривизна поверхні:

$K = \frac{f'' + f'^3/r + f'/r}{2(1 + f'^2)^{3/2}}$; B_n, B_τ, H_n, H_τ — нормальні та тангенціальні складові векторів магнітної індукції та напруженості МП відповідно відносно вільної поверхні.

Основною причиною витягування є переорієнтація магнітних доменів всередині краплі, тобто перерозподіл часток дисперсної фази в дисперсійному середовищі у разі прикладання МП. За відсутності зовнішнього МП домени розташовані так, що їх результуючий момент є близьким до нуля. При прикладанні МП енергії окремих доменів стають неоднаковими, причому в доменів, у яких вектор намагніченості утворює з напрямком поля гострий кут, енергія менша, ніж у тих, що утворюють тупий. Виникають процеси зміщення меж доменів, за яких об'єм доменів з меншою енергією зростає, з більшою енергією — зменшується. За збільшення напруженості МП зміщення доменів стає незворотнім, а у достатньо сильних магнітних полях енергетично невигідні домени зникають зовсім [4]. Намагніченість рідини починає зростати: $\overline{M}_s = \sum_{i=0}^n \overline{m}_i$, де m_i — магнітний момент однієї частинки, n — кількість частинок, орієнтованих вздовж поля. Намагніченість частинок підвищується зі зменшенням їх розмірів, а з досягненням критичних розмірів, вони стають однодомними, і кожна частинка здатна намагнітитися до насичення [5]. Тобто, існує момент, коли намагніченість припиняє зростати, досягаючи насичення $\overline{M}_s = \sum_{i=0}^N \overline{m}_i$ (N — повна кількість частинок у досліджуваному об'ємі МР). Це створює у краплі різницю тисків вздовж осей, що й змушує краплю витягуватися, а далі — розщеплюватися:

$$\begin{cases} p_a = p_0 + \sigma \left(\frac{1}{R_1^3} + \frac{1}{R_2^3} \right) - \frac{1}{2} \mu_0 M^2; \\ p_b = p_0 + \sigma \left(\frac{1}{R_1^b} + \frac{1}{R_2^b} \right), \end{cases} \quad (2)$$

де p_0 — тиск навколишнього середовища, σ — коефіцієнт поверхневого натягу МР, R_1, R_2 — головні радіуси кривизни поверхні (для ідеального напівеліпсоїда справедливо $R_1^a = R_2^a = a$; $R_1^b = b$; $R_2^b = a$); M — намагніченість МР, μ_0 — магнітна проникність вакууму.

Оскільки поле орієнтоване практично перпендикулярно поверхні підкладки, крапля витягується в основному вздовж осі a напівеліпсоїда.

Експеримент

Експеримент проводився з декількома МР різного складу: синтезовані авторами МР на основі рослинної олії (МР № 1), отримана хімічним шляхом МР на основі аміачної води (МР № 2), та МР на основі гасу (МР № 3) виробництва НВВП «Феррогідродинаміка» з початковою намагніченістю 60 кА/м.

Для рідин знято рентгенограму та проведено якісний фазовий аналіз. Рентгенофазовий аналіз проводився методом порошкової дифрактометрії на автоматизованому дифрактометрі Ultima IV (Rigaku) з геометрією зйомки за Бреггом–Брентано у випромінюванні $\text{CuK}\alpha$ смуги анода ($\lambda = 1,541874$ Å) з Fe-фільтром у відбитому пучку.

На рис. 2 показано рентгенограму МР № 3, а також дифракційні піки рентгенограми речовини $\text{Fe}_{2,18}\text{O}_4\text{Ti}_{0,42}$, які найкраще збігаються з піками для МР № 3. На рентгенограмі найінтенсивніші лінії (піки) відповідають дисперсній фазі МР.

Значення середнього ефективного розміру областей когерентного розсіяння $\text{Fe}_{2,18}\text{O}_4\text{Ti}_{0,42}$ (згідно з рівнянням Шеррера за припущення, що всі зерна є сферичними): $D = \frac{0,94\lambda}{b(2\theta)\cos\theta}$, де $b(2\theta)$ —

ефективна ширина на напіввисоті найінтенсивніших ліній. Отримано частинки найімовірнішого розміру від $5,8 \pm 1,0$ нм до $8,7 \pm 1,0$ нм.

Для МР № 1 та МР № 2 процес розщеплення за умов проведення експерименту не спостерігається.

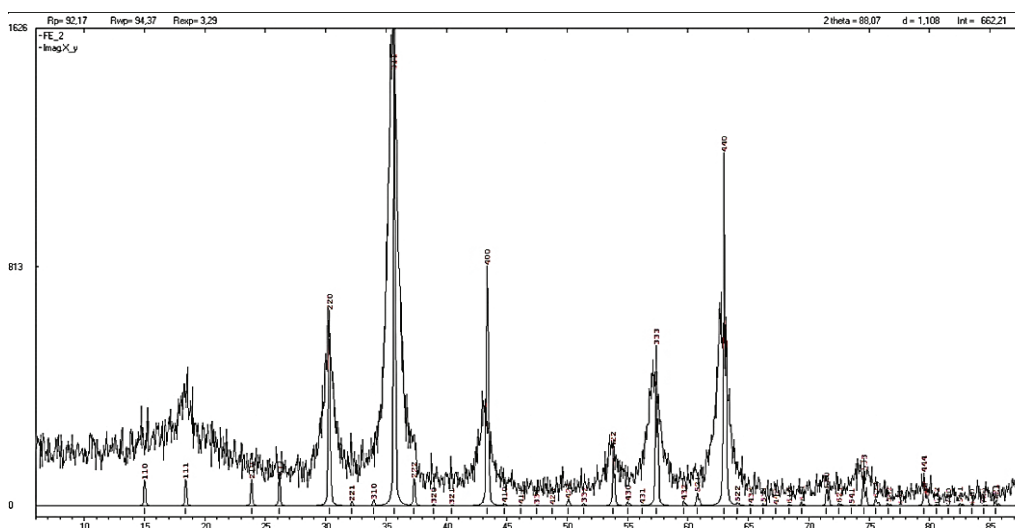


Рис. 2. Рентгенограма МЖ № 3

Методика експерименту з визначення залежності геометричних розмірів краплі МР від МП. За відсутності МП на підкладинку розміщувалася крапля МР. У разі прикладеного МП крапля деформувалася та приймала вертикальний пікоподібний вигляд. За рахунок зміни відстані між пластиною та магнітом під нею, МП змінювалося з кроком 0,1 мТл, вимірювалися величина поля та висота краплі. Експеримент проводився до досягнення максимального значення поля для цієї установки.

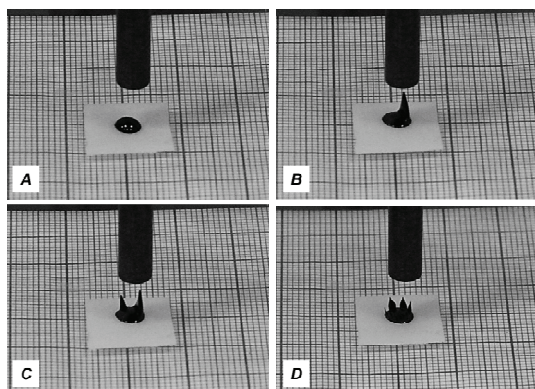


Рис. 3 Витягування та розпад крапель МР в МП

Використовувалася підкладинка з водовідштовхуючої гуми, і для гасу (основа МР № 3) має місце лише часткова незмочуваність. Тому одночасно з краплею, що витягнулася, існувала «калюжа» МР, яку можна бачити на рис. 3.

В експерименті використано неодимовий магніт, характеристики якого зведено у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри магніту

Параметр	Значення
Форма	диск
Діаметр	30 мм
Товщина	10 мм
Вага	54 г
Залишкове магнітне поле	1,2 Тл
Максимальна магнітна енергія	287...303 Дж/м ³

Результати експерименту та обговорення

Нанометровий розмір магнітних часток визначає однодомений стан їх намагніченості, що приводить до практично суперпарамагнітної поведінки з точки зору магнітних властивостей.

Після досягнення деякого значення поля ріст краплі припиняється за рахунок критичного значення поверхневого натягу (принцип мінімуму енергії). Крапля починає розтягуватися по горизонталі та, як наслідок, сплющуватися та розпадатися на дві меншої висоти. Відбувається зміщення центру мас, збільшення площі вільної поверхні, зменшується потенційна енергія системи. Розпад краплі починається у верхній точці внаслідок нерівномірності поверхневого натягу через максимальну кривизну поверхні.

У цьому експерименті розпад відбувався двічі (початкова та більша з дочірніх крапель), у результаті чого утворювалися три відростки. За таких умов є два ймовірних типи поведінки краплі

для деяких значень МП: розпад та ріст нової краплі з «калюжі». Ймовірність кожного з типів визначається вигіднішим в енергетичному плані станом, що отримується. Існує момент, коли енергетично вигідніше отримати четвертий відросток із залишкового об'єму, ніж дробити вже існуючі крапельки. Емпіричний графік залежності висоти краплі від напруженості МП, що відображає тенденцію деформації краплі у МП, показано на рис. 4.

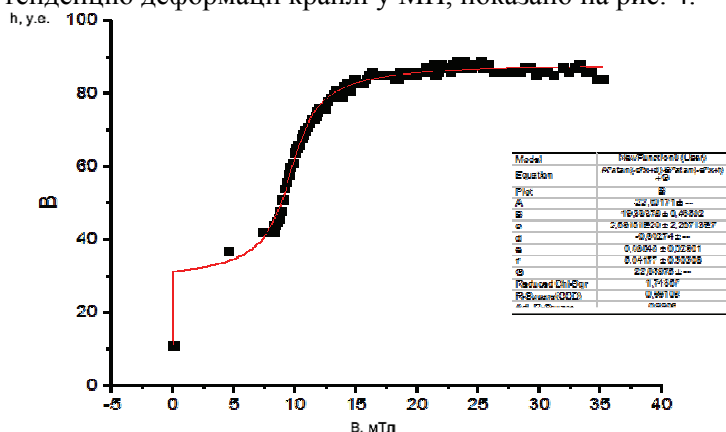


Рис. 4. Експериментальна залежність висоти краплі МР від МП

Для МР відсутнє явище залишкової намагніченості, спостерігається практично повна відсутність гістерезиса. Тому в якості математичної моделі слід застосовувати вираз, що описує безгістерезисну криву намагнічування. Вибрано вираз, близький до опису основної кривої намагнічування за Пономарьовим [6], як такий, що найточніше описує експериментально отриману залежність

$$M = A(\arctg(d - cH) + \arctg(f - eH)) + B. \quad (3)$$

Апроксимація проводилася за допомогою програмного пакета OridginLab 8.5.

Коефіцієнти виразу зведені у табл. 2, де σ — квадратичне відхилення експериментальних точок від апроксимуючої функції. За його значенням можна бачити, що апроксимація є достатньо точною. Деякі розходження можуть бути викликані тим фактом, що за сплюснення зміна геометричних розмірів вздовж осі b стає суттєвішою.

Необхідно вказати, що зменшення намагніченості за великих полів, яке спостерігається на графіку, пов'язане, ймовірно, з більш активним утворенням кластерів, що приводить, у свою чергу, до збільшення впливу магніто-неактивного шару ПАР на поверхні часток на поведінку рідини в цілому [3].

Висновки

Досліджено поведінку краплі МР на твердій гумовій частково незмочуваній підкладці у МП у процесі намагнічування краплі. Запропоновано фізико-математичну модель процесу деформації та розпаду краплі, що відповідає загальним уявленням про намагнічування магнітних рідин, з урахуванням їх доменної структури. Отримано експериментальні залежності змін геометричних параметрів напівобмеженої краплі МР від МП, що відповідають цій моделі. Встановлена можливість побудови кривої намагнічування МР на основі цих залежностей. В обраному напрямку авторами продовжуються дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ю. Д. Барков, и Б. М. Берковский, «Распад капли намагничивающейся жидкости.» *Магнитная гидродинамика*, № 3, с. 11-14, 1980.
- [2] В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс, и Аль-Джаиш Таха Малик Мансур, «Топологическая неустойчивость полуограниченной капли магнитной жидкости.» *Весті національної академії наук Белорусі, Серія фізика технічних наук*, № 4, 2013.
- [3] А. А. Федоренко «Динамика магнитной жидкости в скрещённых магнитных полях» дис. на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук. Пермь, 2007.
- [4] К. В. Найгерт, «Моделирование и расчёт рабочих процессов магнитореологического дроселя» дис. на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук. Челябинск, 2016.

[5] T. Albrecht et al, "First observation of ferromagnetism and ferromagnetic domains in a liquid metal (abstract)," *Applied Physics A Materials Science&Processing*, Т. 65, с. 215, 1997.

[6] В. Ф. Матюк В. Ф., и А. А. Осипов, «Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса,» часть 1, *Анализ моделей. Неразрушающий контроль и диагностика. Научные публикации*, № 2, с. 3-35, 2011.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

Гільчук Андрій Володимирович — старший викладач кафедри фізики енергетичних систем, e-mail: a.v.gilchuk@gmail.com ;

Голяткіна Марина Олексіївна — студент Фізико-технічного інституту, e-mail: holiatkina@ukr.net ;

Кришталь Анна Олександрівна — студент Фізико-технічного інституту, e-mail: sherlock98@ukr.net .

Національний технічний університет «Київський політехнічний інституті м. Ігоря Сікорського», Київ

A. V. Hilchuk¹
M. O. Holiatkina¹
A. O. Kryshtal¹

Research of Magnetic Fluid's Magnetization Mechanism by Deformation of Droplet in Magnetic Field

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

An important feature of magnetic fluids is the topological instability of their volumes which have a free surface in the magnetic fields (the phenomenon of loss of their integrity under certain conditions). Such drop splitting is of scientific interest, as well as of practical interest. Understanding the mechanism of this phenomenon will allow eliminating or controlling these effects, which is important for many sensitive devices. The authors' investigations were aimed at solving the problem of describing the splitting of a droplet of magnetic fluid, which lie on a horizontal solid partially wettable rubber substrate, in a magnetic field of a permanent magnet and an experimental determination of the type of dependence of the change in the height of a magnetic fluid's droplet in magnetic field.

In Ukraine, the research of magnetic fluids is carried out by a number of scientific organizations, such as Institute for Nuclear Research, V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry, Taras Shevchenko National University of Kyiv etc.

The main reason for the drop extension in the magnetic field is the reorientation of the magnetic domains within it. The magnetization of the liquid begins to increase. This makes a pressure along the axes in the drop, which causes the droplet to stretch and then split.

The experiment was carried out with three magnetic fluids with different components. The process of splitting under the experimental conditions is observed only for one which composition was unknown. It took an X-ray and carried out a qualitative phase analysis. Particles of the most probable size from $5,8 \pm 1,0$ nm to $8,7 \pm 1,0$ nm were obtained.

An experiment was performed to determine the dependence of the geometric parameters of the droplet of magnetic fluid in the magnetic field. The magnitude of the field and the height of the drop were measured. The experiment was carried out until the maximum value of the installation field was reached. The obtained dependence can characterize the hysteresis-free magnetization curve of the magnetic fluid. Approximation was carried out on the basis of arctangent functions.

The conditions for the rupture of a magnetic fluid droplet on a solid rubber partially non-wettable substrate in a magnetic field are investigated. Several magnetic fluids of different composition are considered. An optimal physico-mathematical model of the process is proposed. Experimental dependences of the discontinuity of a semibounded droplet of magnetic fluids in magnetic field, corresponding to the model taken, are obtained. The analysis is carried out within the framework of this model. In the chosen direction, the authors continue their research.

Keywords: magnetic fluid, magnetic field, semibounded droplet, magnetization curve.

Hilchuk Andrii V. — Senior Lecturer of the Chair of Physics of Energy Systems, e-mail: a.v.gilchuk@gmail.com ;

Holiatkina Maryna O. — Student of Physico-Technical Institute, e-mail: holiatkina@ukr.net ;

Kryshtal Anna O. — Student Physico-Technical Institute, e-mail: sherlock98@ukr.net

А. В. Гильчук¹
М. А. Голяткина¹
А. А. Кришталь¹

Исследование механизма намагничиваемости магнитной жидкости по деформации капли в магнитном поле

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Важной особенностью магнитных жидкостей является топологическая неустойчивость их объемов, имеющих свободную поверхность в магнитных полях (явление потери их целостности при определенных условиях). Такое расщепление капли вызывает научный интерес и практический интерес. Понимание механизма этого явления позволит устранить или контролировать эти эффекты, что важно для многих чувствительных устройств. Цель исследования — решение проблемы описания расщепления капли магнитной жидкости, лежащей на горизонтальной твердой частично смачиваемой резиновой подложке, в магнитном поле постоянного магнита и экспериментальное определение типа зависимости изменения высоты капель магнитной жидкости в магнитном поле.

В Украине исследования магнитных жидкостей проводятся в Институте ядерных исследований, Институте общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского, Киевском национальном университете имени Тараса Шевченко и др. Основной причиной расширения капли в магнитном поле является переориентация магнитных доменов внутри него. Намагниченность жидкости начинает возрастать. Это создает давление вдоль осей в капле, что заставляет капли растягиваться и затем расщепляться.

Эксперимент проводился с тремя магнитными жидкостями и с различными компонентами. Получены частицы наиболее вероятного размера от $5,8 \pm 1,0$ нм до $8,7 \pm 1,0$ нм. Проведен эксперимент для определения зависимости геометрических параметров капли магнитной жидкости от магнитного поля. Измерена величина поля и высота капли. Эксперимент проводился до достижения максимального значения поля установки. Полученная зависимость может характеризовать гистерезисную кривую намагничивания магнитной жидкости. Аппроксимация проводилась на основе арктангенциальных функций.

Исследованы условия разрыва капель магнитной жидкости на твердой резиновой частично не смачиваемой подложке в магнитном поле. Рассмотрены несколько магнитных жидкостей разного состава. Предложена оптимальная физико-математическая модель процесса. Получены экспериментальные зависимости разрыва полуограниченной капли магнитных жидкостей в магнитном поле, соответствующие этой модели. Анализ проводился в рамках этой модели.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное поле, полуограниченная капля, кривая намагничивания.

Гильчук Андрей Владимирович — старший преподаватель кафедры физики энергетических систем, e-mail: a.v.gilchuk@gmail.com ;

Голяткина Марина Алексеевна — студент Физико-технического института, e-mail: holiatkina@ukr.net ;

Кришталь Анна Александровна — студент Физико-технического института, e-mail: sherlock98@ukr.net