9. Pshenichnikov A.F., Lebedev A. V. Magnetic susceptibility of concentrated ferrocolloids // Colloid J. 2005. Vol. 67, № 2. P. 189-200.
10. Dikanskii Y.I., Ispiryan A.G., Kunikin S.A. On the Form of the Functional Dependence of the Magnetic Susceptibility of a Magnetic Liquid on the Temperature // Russ. Phys. J. 2017. Vol. 60, № 1. P. 181-189.
11. Dikanskii Y.I., Ispiryan A.G., Kunikin S.A., Radionov A. V On the Nature of the maximum in the temperature dependence of magnetic liquid susceptibility // Tech. Phys. 2015. Vol. 60, № 8. P. 1204-1207.
12. Fang W.-X., He Z.-H., Xu X.-Q., Mao Z.-Q., Shen H. Magnetic-field-induced chain-like assembly structures of Fe 3 O 4 nanoparticles // Europhys. Lett. 2007. Vol. 77, № 6. P. 68004.
13. Dikansky Y.I., Gladkikh D.V., Kunikin S.A., Zolotukhin A.A. Magnetic ordering in colloidal systems of single-domain particles // Magnetohydrodynamics. 2012. Vol. 48, № 3. P. 493-502.
14. Dikansky Y.I., Balabanov K.A., Borisenko O. V, Kiselev V. V. Magnetic ordering in a magnetic fluid containing quasi-solid aggregates // Magnetohydrodynamics. 1997. Vol. 33, № 22. P. 202-204.

ОСОБЕННОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ С НАМАГНИЧЕННЫМИ АГРЕГАТАМИ В МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ

Диканский Ю.И., Гладких Д.В., Испирян А.Г.
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
355009 г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: dikansky@mail.ru

Как известно, магнитные свойства магнетика могут существенно изменяться при изменении его формы от объемной к пленочной. В связи с этим интерес должны представлять тонкие слои и пленки магнитной жидкости. Действительно, исследованию тонких пленок магнитной жидкости посвящено достаточно большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ [1-5], в которых

в основном рассматривалось их структурное состояние в магнитных и электрических полях. При этом практически не проводились исследования, посвященные сопоставлению физических свойств (в частности, магнитных) пленочных и объемных образцов. Также практически отсутствуют работы по изучению зависимости физических свойств пленочных образцов магнитных коллоидов от их толщины (за исключением проведенных нами исследований в работе [6]). Очевидно, что кинетика намагничивания таких образцов также должна иметь существенные отличия. Актуальность этого возрастает при содержании в исследуемой жидкости хорошо развитой системы намагниченных агрегатов. В этом случае, в тонком образце такой среды может возникать структурное упорядочение диполей при воздействии внешних полей [7]. Это в свою очередь должно оказывать существенное влияние на процессы намагничивания таких систем и его кинетику.

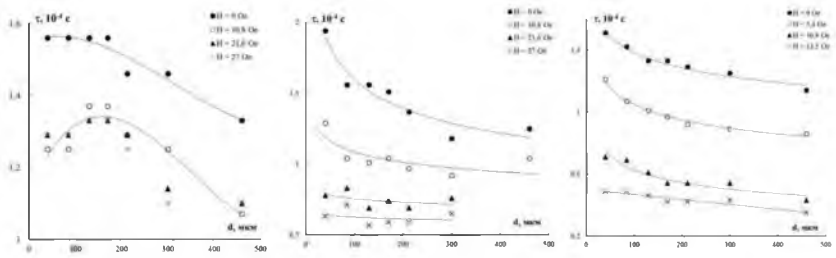
Как известно, на структурное состояние магнитных коллоидов существенное влияние могут оказывать также и электрические поля. Однако их влияние на процессы намагничивания тонких слоев МЖ с намагниченными агрегатами до сих пор не было изученным.

Целью настоящей работы является исследование особенностей намагничивания образцов магнитных коллоидов на различных основах с хорошо развитой системой намагниченных агрегатов в зависимости от формы измерительной ячейки в магнитном и электрическом полях.

Ранее нами были предприняты исследования тонких слоев таких магнитных жидкостей [8]. Было обнаружено, что процессы намагничивания объемных образцов и тонких слоев отличаются. Причем для тонких слоев исследуемой магнитной жидкости была установлена зависимость магнитных свойств от толщины слоя.

С целью продолжения начатых исследований были проведены частотные исследования комплексной магнитной восприимчивости магнитных коллоидов на основе керосина с намагниченными агрегатами в случае их объемных образцов цилиндрической формы, а также тонких слоев. Также для сравнения проводились аналогичные исследования однородного образца такой объемной концентрации. Для тонких слоев исследования частотных зависимостей магнитной восприимчивости проводились для трех конфигураций магнитных

полей: внешнее постоянное магнитное поле перпендикулярно измерительному полю и плоскости слоя (конфигурация 1); внешнее поле перпендикулярно измерительному и параллельно плоскости слоя (конфигурация 2); внешнее поле параллельно измерительному и плоскости слоя (конфигурация 3).



а) конфигурация 1 б) конфигурация 2 в) конфигурация 3

Рисунок 1- Зависимость времени релаксации от толщины слоя при различных ориентациях внешнего и измерительного полей

Для всех исследованных образцов (цилиндрической формы и тонких слоев) было обнаружено, что частотные зависимости мнимой части комплексной магнитной восприимчивости претерпевают максимум при некоторой частоте даже в отсутствии внешнего магнитного поля, что позволило рассчитать время релаксации. Так, для объемных (цилиндрических) образцов было установлено, что время релаксации увеличивается при уменьшении диаметра трубки с образцом как в случае параллельной ориентации измерительного и внешнего постоянного магнитных полей, так и в случае их взаимно перпендикулярной ориентации. Для тонких слоев образца магнитной жидкости с намагниченными агрегатами, обнаружена аналогичная картина – при уменьшении толщины слоя время релаксации увеличивается. Однако характер этой зависимости отличается для разных взаимных ориентаций измерительного и внешнего полей (рис. 1). В случае, когда внешнее магнитное поле направлено параллельно слою (конфигурации 2 и 3), уменьшение толщины слоя приводит к монотонному возрастанию времени релаксации. В случае, когда внешнее магнитное поле перпендикулярно плоскости слоя и измерительному полю (конфигурация 1), на зависимости времени

релаксации от толщины слоя появляется максимум, положение которого не зависит от величины внешнего магнитного поля. Следует отметить, что для тонких слоев однородного образца магнитного коллоида, не содержащего агрегатов, частотные зависимости комплексной магнитной восприимчивости не испытывают максимума во всем исследованном диапазоне внешних магнитных полей.

Была получена теоретическая зависимость времени релаксации от толщины слоя для однородного образца магнитной жидкости в случае, когда внешнее магнитное поле перпендикулярно измерительному и плоскости слоя (конф.1). Время релаксации определялось по формуле [9].

$$\tau = \tau_B \left(1 - \frac{1}{6} \left(\frac{\mu_0 m H_{ист}}{kT} \right)^2 \right).$$

$$H_{ист} = H_0 - NM.$$

$$N = \frac{1}{N_c + 0.144 \frac{a}{b} \frac{d}{\sqrt{bd}} e^{\left(-0.025 \frac{a}{\sqrt{bd}}\right)}}$$

N_c – размагничивающий фактор эквивалентного цилиндра, имеющего такую же площадь поперечного сечения, что и прямоугольный образец.

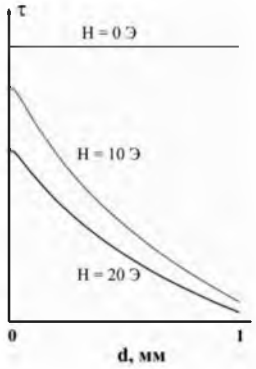


Рисунок 2 - Зависимость времени релаксации от толщины для однородного образца МЖ

Полученные теоретические зависимости времени релаксации от толщины представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка для однородного образца зависимость времени релаксации от толщины

слоя носит монотонно убывающий характер при воздействии внешнего магнитного поля. При отсутствии внешнего поля время релаксации не зависит от толщины в исследованном диапазоне толщин.

Было установлено, что воздействие переменного электрического поля также приводит к изменению магнитных свойств исследованного образца МЖ. На рис. 3 приведены зависимости относительной магнитной восприимчивости (χ_0 – магнитная восприимчивость при напряженности электрического поля E = 0 кВ/м) от величины действующего значения напряженности переменного электрического поля различной частоты.

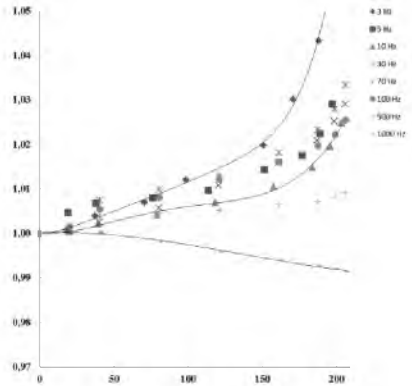


Рисунок 3 - Зависимость относительной магнитной восприимчивости от величины действующего значения напряженности переменного электрического поля

Как видно из рисунка, при низких частотах (3-100 Гц) переменного электрического поля относительная магнитная восприимчивость монотонно возрастает при увеличении величины электрического поля. При частотах ~ 500 Гц относительная магнитная восприимчивость практически перестает меняться с ростом поля. При частотах больших 1000 Гц наблюдается монотонное уменьшение величины относительной магнитной восприимчивости.

Дополнительное воздействие постоянного магнитного поля, направленного вдоль слоя с образцом магнитной жидкости и перпендикулярного электрическому полю, приводит к существенному

изменению зависимости магнитной восприимчивости от электрического поля. На рис. 4 приведены зависимости относительной магнитной восприимчивости от величины действующего значения напряженности переменного электрического поля различной частоты при дополнительном воздействии постоянного магнитного поля с напряженностью H = 380 А/м.

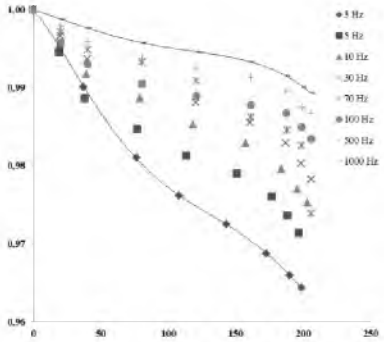


Рисунок 4 - Зависимость относительной магнитной восприимчивости от величины действующего значения напряженности переменного электрического поля при дополнительном воздействии постоянного магнитного поля

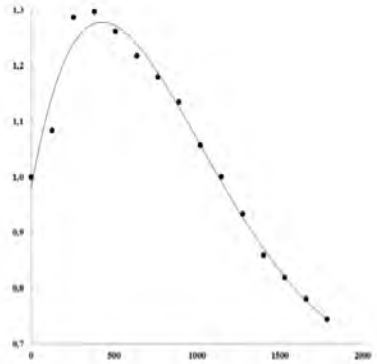


Рисунок 5 - Зависимость относительной магнитной восприимчивости от величины напряженности постоянного магнитного поля, направленного вдоль слоя МЖ

В этом случае величина относительной магнитной восприимчивости монотонно убывает с ростом напряженности электрического

поля для всех исследованных частот. Однако, как можно видеть из рисунка, с ростом частоты переменного электрического поля изменение относительной магнитной восприимчивости становится меньше.

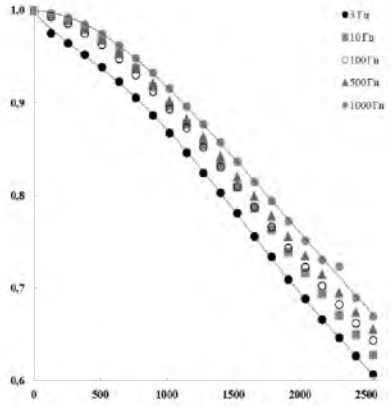


Рисунок 6 - Зависимость относительной магнитной восприимчивости от напряженности постоянного магнитного поля при дополнительном воздействии переменного электрического поля

Также были проведены исследования магнитной восприимчивости от величины постоянного магнитного поля, направленного вдоль слоя с МЖ, при дополнительном воздействии переменного электрического поля, направленного перпендикулярно магнитному полю.

Было обнаружено, что при воздействии на исследуемый образец только постоянного магнитного поля зависимость магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля претерпевает максимум (рис. 5), аналогичный описанному в [8]. Наличие данного максимума, по-видимому, можно объяснить тем, что в отличие от исследованного образца МЖ на основе керосина, толщины слоев которого не превышали 500 мкм, толщина слоя исследованного образца МЖ на вакуумном масле составляла 900 мкм и его уже нельзя отнести к тонкому слою, следовательно, должны наблюдаться зависимости, как и для объемных образцов, исследованных в [8].

Дополнительно воздействие переменного электрического поля, направленного перпендикулярно слою МЖ и магнитному полю, приводит к существенному изменению зависимости относительной вос-

приимчивости от величины магнитного поля. Так, при воздействии переменного электрического поля с напряженностью E = 39,4 кВ/м, зависимость относительной магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля становится монотонно убывающей (рис. 6).

Очевидно, что установленные особенности магнитной восприимчивости исследованного образца магнитной жидкости связаны с процессами изменения структурного состояния в системе намагниченных агрегатов при воздействии на образец переменного электрического и постоянного магнитного полей. В результате оптических наблюдений было установлено, что при воздействии на образец только переменного электрического поля низкой частоты (3-100 Гц) агрегаты, оставаясь обособленными, приходили во вращательное движение, интенсивность которого возрастала при увеличении напряженности поля. По-видимому, с этим и связано увеличение относительной магнитной восприимчивости (см. рис. 3, кривая 3 Гц). Увеличение частоты переменного электрического поля приводило к уменьшению частоты вращательного движения, в результате чего магнитная восприимчивость изменялась в меньшей степени (рис. 3, кривые 10-100 Гц). При частотах больших 500 Гц наблюдалось частичное объединение агрегатов в вытянутые крупные структуры, которые при увеличении напряженности переменного электрического поля начинали ориентироваться по направлению электрического поля. Таким образом, в измерительной ячейке они должны были располагаться перпендикулярно измерительному магнитному полю, что должно приводить к уменьшению магнитной восприимчивости, что и наблюдалось в опыте (рис. 3, кривая 1000 Гц).

При дополнительном воздействии постоянного магнитного поля, перпендикулярного электрическому, намагниченные агрегаты начинали объединяться в вытянутые вдоль магнитного поля протяженные структуры. Действие переменного электрического поля приводило к периодическому отрыву от этих крупных конгломератов более мелких, вытянутых, по-прежнему, вдоль магнитного поля образований, состоящих из нескольких намагниченных агрегатов. После отрыва такое образование практически сразу притягивалось к соседнему конгломерату. Интенсивность таких отрывов и перескоков оказалась зависящей от частоты переменного электрического поля – с ростом частоты поля интенсивность убывала. Также на эти

процессы существенное влияние оказывала величина постоянного магнитного поля. При больших значениях напряженности постоянного магнитного поля все агрегаты оказывались объединенными в вытянутые вдоль магнитного поля конгломераты, на конфигурацию которых электрическое поле практически не оказывало влияние. По-видимому, этими процессами и объясняются зависимости магнитной восприимчивости, приведенные на рисунках 4 и 6.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 16-03-00054).

Литература:

1. Hao Wang, Yun Zhu, C. Boyd, Weili Luo, A. Cebers, and R.E. Rosensweig. Periodic Branched Structures in a Phase-Separated Magnetic Colloid // Phys. Rev. Let. – 1994. – Vol. 72, No. 12. – P. 1929-1932.
2. Jing Liu, E.M. Lawrence, A. Wu, M.L. Ivey, G.A. Flores, K. Javier, J. Bibette, and J. Richard. Field-Induced Structures in Ferrofluid Emulsions // Phys. Rev. Let. – 1995. – Vol. 74, No. 14. – P. 2828-2831.
3. J.M. Tavares, J.J. Weis, and M.M. Telo da Gama. Quasi-two-dimensional dipolar fluid at low densities: Monte Carlo simulations and theory // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 65. – P. 061201.
4. T. Kristóf, I. Szalai. Magnetic properties in monolayers of a model polydisperse ferrofluid // Phys. Rev. E. – 2005. – Vol. 72. – P. 041105.
5. R. Haghgooie and P.S. Doyle. Transition from two-dimensional to three-dimensional behavior in the self-assembly of magnetorheological fluids confined in thin slits // Phys. Rev. E. – 2007. – Vol. 75. – P. 061406.
6. Yu.I. Dikansky, D.V. Gladkikh, A.Yu. Shevchenko, A.A. Sidelnikov. Magnetization features of thin layers of magnetic fluids with a well-developed system of magnetized aggregates // Magnetohydrodynamics. – 2014. – Vol. 50. No. 1. – P. 27-33.
7. D.V. Gladkikh, Yu.I. Dikansky, A.A. Kolesnikova. Structural transformations in a thin layer of magnetic colloid with magnetized aggregates exposed to an elliptically polarized rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Vol. 52. No. 3. – P. 319-332.

Литература: 8. Yu.I. Dikansky, D.V. Gladkikh, S.A. Kunikin, A.A. Zolotukhin. Magnetic ordering in colloidal systems of single-domain particles // Magnetohydrodynamics. – 2012. – Vol. 48. No. 3. – P. 493-501.
9. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // УФН. – 1974. – Т. 112, вып. 3. – С. 427-458.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Закинян А.Р.
Кафедра общей и теоретической физики, Северо-Кавказский федеральный университет, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия.
E-mail: zakinyan.a.r@mail.ru

В последнее время предпринимаются попытки создания на основе ферроколлоидов (магнитных жидкостей) новых композиционных жидких намагничивающихся сред, способных более эффективно взаимодействовать с магнитными и электрическими полями. К таким средам следует отнести магнитодиэлектрические эмульсии, которые могут представлять собой как капли магнитной жидкости, взвешенные в жидкой среде, так и капли жидкой среды, взвешенные в магнитной жидкости [1–3]. Действие магнитного поля на магнитные эмульсии приводит к возникновению в них структурной анизотропии и, как следствие, к изменению их макроскопических свойств. Настоящая работа посвящена исследованию электрических свойств таких сред.

Были исследованы структурные и электрические свойства эмульсий, представляющих собой ансамбль диспергированных в магнетитовой магнитной жидкости на основе керосина капель воды. Наблюдение структурных превращений в эмульсии осуществлялось при помощи оптического микроскопа. Исследование удельной электрической проводимости (λ) и диэлектрической проницаемости (ε) эмульсий осуществлялось мостовым методом в соответствии с методикой электрических измерений, описанной в [4]. Для измерений применялся промышленный мост переменного тока GW Instek LCR-8110G. Исследуемая эмульсия помещалась в ячейку, представляющую собой прямоугольный конденсатор с медными электрода-