

03

Магнитная восприимчивость магнитной жидкости на кремнийорганической основе в электрическом и магнитном полях

© Ю.И. Диканский, Д.В. Гладких, С.А. Куникин, А.В. Радионов

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь
E-mail: Dikansky@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 сентября 2014 г.

Рассмотрено влияние электрического поля на магнитную восприимчивость магнитной жидкости на кремнийорганической основе. Исследованы особенности зависимости магнитной восприимчивости такого коллоида от воздействия электрического поля, а также совместно действующих электрического и магнитного полей. Обнаружено влияние электрического поля на ход температурной зависимости магнитной восприимчивости. Полученные результаты связаны со структурными изменениями системы под воздействием внешних полей — возникновением лабиринтной в электрическом поле структуры и ее трансформацией в дополнительно приложенном магнитном поле.

Воздействие электрического поля на магнитные жидкости (МЖ) может приводить к развитию в них процессов структурообразования и, как следствие, изменению их физических свойств. Действительно, в ряде работ [1–4] сообщается о возникновении периодических структурных решеток в МЖ, подверженных действию электрического и магнитного полей, и влиянии этого явления на физические (оптические, реологические) свойства. При этом исследования проведены в основном для МЖ на основе керосина. В МЖ других типов изучение периодических структур и влияние их возникновения под действием постоянного электрического поля (а также дополнительного магнитного поля) на магнитные свойства до настоящего времени не проводилось. Вместе с тем такие исследования являются актуальными для МЖ, имеющих практическое значение, которые в процессе их работы в различного рода устройствах могут испытывать действие не только магнитных, но и электрических полей. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование влияния электрического поля на

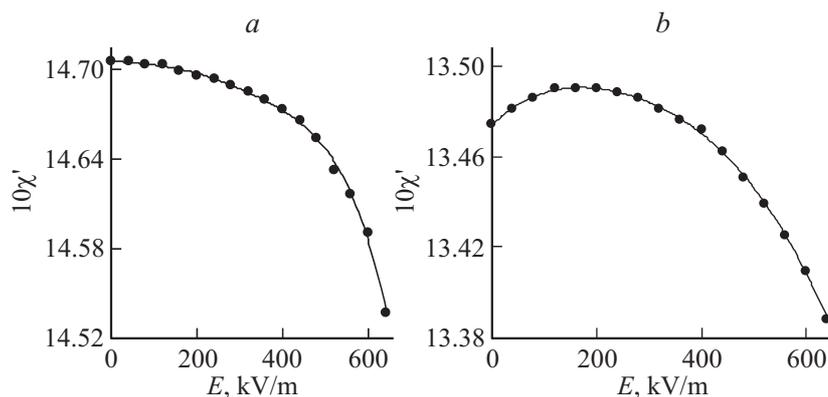


Рис. 1. Изменение зависимости магнитной восприимчивости от напряженности электрического поля при дополнительном воздействии магнитного поля H , A/m: a — 0, b — 800.

магнитные свойства МЖ, синтезированной на полиэтилсилоксановой основе, используемой в технике в качестве магнитожидкостной уплотняющей среды.

В качестве объекта исследования была использована МЖ с магнетитовыми частицами на основе ПЭС-3 (полидиэтилсилоксан). В качестве исследуемого магнитного параметра была выбрана магнитная восприимчивость, являющаяся наиболее чувствительной к изменению структуры среды. Магнитная восприимчивость измерялась мостовым методом на частоте 1 kHz. Для изучения влияния дополнительно приложенного внешнего магнитного поля измерительная ячейка с МЖ помещалась в кубическую пятисекционную катушку так, что магнитное поле могло быть направлено как параллельно, так и перпендикулярно электрическому.

Экспериментально полученная зависимость эффективной восприимчивости исследованной МЖ от напряженности электрического поля приведена на рис. 1, a .

Как видно из графика, магнитная восприимчивость МЖ при напряженности электрического поля E , не превышающей ~ 200 kV/m, практически не зависит от величины поля. При дальнейшем увеличении электрического поля первоначально незначительное уменьшение

восприимчивости (в интервале 200–400 kV/m) переходит к ее существенному падению при достижении напряженности $E \sim 400$ V/m.

Во внешнем постоянном магнитном поле, которое направлено перпендикулярно электрическому и сонаправленно с переменным измерительным полем, характер зависимости $\chi'(E)$ существенно изменяется. Так при напряженности внешнего магнитного поля $H = 800$ A/m на этой зависимости появляется максимум, относительная величина которого увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля (рис. 1, *b*).

По-видимому, подобные зависимости эффективной магнитной восприимчивости от напряженности приложенного электрического поля связаны с процессами структурообразования в исследуемой среде. Как уже было указано выше, ранее было обнаружено, что действие постоянного электрического поля, направленного перпендикулярно плоскости слоя первоначально однородной МЖ на основе керосина, приводит при некотором пороговом значении напряжения на электродах к возникновению структурной решетки [5]. При этом первоначально в приэлектродной области происходит образование микрокапельных агрегатов, которые при дальнейшем увеличении напряженности электрического поля трансформируются в лабиринтную решетку. Проведенные с помощью оптического микроскопа наблюдения показали, что и в исследованном образце МЖ на основе полиэтилсилоксана при напряженности электрического поля порядка 200 kV/m происходит образование лабиринтной структуры, причем оно носит пороговый характер (рис. 2).

По-видимому, вследствие возникновения подобной структуры и происходит уменьшение магнитной восприимчивости МЖ. Формирующаяся в приэлектродном слое лабиринтная решетка представляет собой область повышенной концентрации дисперсных частиц, которые поступают сюда из основного объема МЖ. Можно предположить, что уменьшение магнитной восприимчивости происходит в результате уменьшения концентрации частиц магнетита в основном объеме и увеличения эффективного размагничивающего фактора N структуры приэлектродного слоя в направлении измерительного поля.

Максимум в зависимости $\chi'(E)$, возникающий при дополнительном воздействии внешнего постоянного магнитного поля, по-видимому, обусловлен изменением формы структурных образований в результате дополнительного действия магнитного поля. Вероятно, его появление

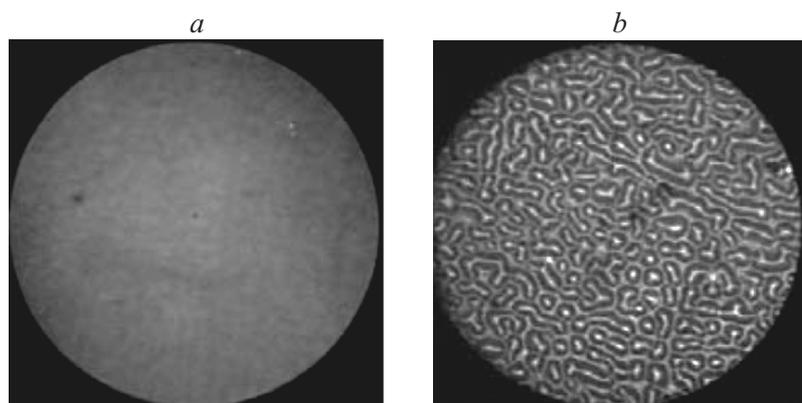


Рис. 2. Структура, формирующаяся в тонком слое МЖ на основе ПЭС-3 под действием постоянного электрического поля E , kV/m: a — 150, b — 200.

связано с первоначальным образованием в приэлектродной области микрокапельных агрегатов, которые под действием внешнего магнитного поля вытягиваются вдоль измерительного поля, в результате чего их размагничивающий фактор уменьшается. В итоге магнитная восприимчивость первоначально увеличивается. Действительно, как показали наблюдения в оптический микроскоп, при совместном действии магнитного и электрического поля при некоторой напряженности последнего в тонком слое исследованной МЖ вместо лабиринтной решетки возникает полосчатая структура. Это приводит к увеличению размагничивающего фактора агрегатов N .

Затем происходит искривление агрегатов и формирование лабиринтной структуры, что должно проявляться в еще большем увеличении N .

При достаточно больших (свыше 600 kV/m) напряженностях электрического поля, когда развиваются электрогидродинамические течения, приводящие к разрушению возникшей структуры. Результатом этих процессов и является уменьшение суммарной магнитной восприимчивости магнитной жидкости.

Теоретическое обоснование экспериментально полученных зависимостей $\chi'(E)$ можно провести, используя выражение для магнитной

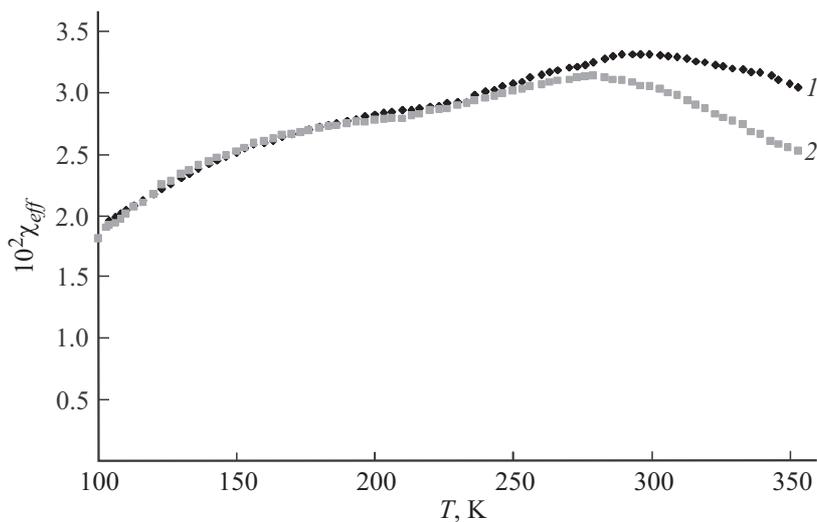


Рис. 3. Температурная зависимость магнитной восприимчивости магнитной жидкости на основе ПЭС-3 в отсутствие электрического поля (1) и при включении постоянного электрического поля напряженностью 200 kV/m (2).

восприимчивости двухкомпонентной среды

$$\chi_{eff}(E) = \frac{\chi_1 \theta}{1 + N(E)\chi_1} + \chi_2(1 - \theta),$$

где χ_1 и χ_2 — восприимчивости приэлектродного (структурированного) слоя и основного объема МЖ соответственно, $N(E)$ — размагничивающий фактор лабиринтной структуры, θ — ее объемная доля. Как видно из последнего выражения, при увеличении размагничивающего фактора приэлектродного слоя происходит уменьшение суммарной магнитной восприимчивости системы.

Также экспериментально была исследована зависимость эффективной восприимчивости МЖ от температуры образца при отсутствии и включении постоянного электрического поля напряженностью 200 kV/m. Полученные результаты приведены на рис. 3. Как видно из графика, включение электрического поля приводит к явному смещению температурного максимума магнитной восприимчивости в область более

низких температур. По-видимому, подобное поведение температурной зависимости эффективной магнитной восприимчивости от напряженности приложенного электрического поля связано с описанными выше процессами структурообразования в исследуемой среде.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возможности управления магнитными свойствами магнитных жидкостей на полиэтилсилоксановой основе с помощью дополнительного воздействия электрическим полем.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект № 14-03-00312 а) и Министерства образования Российской Федерации.

Список литературы

- [1] Барьяхтар Ф.Г., Горобец Ю.И., Косачевский Л.Я. и др. // Магнитная гидродинамика. 1981. № 2. С. 120–123.
- [2] Цеберс А.О. // Магнитная гидродинамика. 1988. № 2. С. 57–62.
- [3] Dikansky Yu.I., Nechaeva O.A. // Magnetohydrodynamics. 2002. V. 38. N 3. P. 287–297.
- [4] Аверьянов П.В., Кожевников В.М., Морозова Т.Ф. // Сб. научных трудов. Сер. Естественно-научная. Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2002. С. 130–137.
- [5] Диканский Ю.И., Нечаева О.А. // Коллоидный журнал. 2003. Т. 65. № 3. С. 1–5.