

УДК 537.312.8

UDC 537.312.8

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОГО СЛОЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ГРАФИТОВЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**ELECTRICAL PROPERTIES OF A THIN LAYER OF A MAGNETIC FLUID WITH A GRAPHITE FILLER IN A MAGNETIC FIELD**

Мкртчян Левон Спартакович
аспирант

Mkrtchyan Levon Spartakovich
postgraduate student

Закинян Артур Робертович
к.ф.-м.н.

Zakinyan Arthur Robertovich
Cand.Phys.-Math.Sci.

Голота Анатолий Федорович
д.х.н., профессор

Golota Anatoli Fedorovich
Dr.Sci.Chem., professor

Ищенко Виктор Михайлович
д.т.н., профессор
*Ставропольский государственный университет,
Ставрополь, Россия*

Ishchenko Viktor Mikhailovich
Dr.Sci.Tech., professor
Stavropol State University, Stavropol, Russia

Исследуются электрические свойства тонкого слоя магнитной жидкости, содержащего дисперсию микрочастиц графита. Изучается влияние внешнего магнитного поля на особенности электрических свойств

The electrical properties of the thin magnetic fluid layer containing the dispersion of graphite microparticles are studied. The influence of the external magnetic field on the peculiarities of the electrical properties is investigated

Ключевые слова: МАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Keywords: MAGNETIC FLUID, ELECTRIC CONDUCTION, ELECTRIC CAPACITANCE, MAGNETIC FIELD

1. Введение

Магнитные жидкости представляют собой устойчивую коллоидную дисперсию однодоменных наночастиц ферро- или ферромагнитных материалов в несущей жидкости [1]. Благодаря уникальному сочетанию жидкого состояния среды и выраженных магнитных свойств магнитные жидкости привлекают широкий научный интерес, а также находят ряд технических применений. На раннем этапе развития науки о магнитных жидкостях ожидалось, что они окажутся также средой, электрическими и магнитными свойствами которой можно будет управлять с высокой степенью эффективности с помощью внешних полей, что открывало бы довольно интересные перспективы их практического применения. Однако эти ожидания оправдались лишь отчасти в отношении магнитных свойств магнитных жидкостей и практически не оправдались в отношении их электрических

свойств. Обнаруженная зависимость электромагнитных параметров магнитных жидкостей от воздействия магнитных и электрических полей оказалась относительно слабой и не дала возможности широкого применения подобных эффектов.

Вместе с тем на основе магнитных жидкостей оказалось возможным создание новых композиционных сред, которые проявляют более заметную зависимость своих свойств от воздействия магнитных и электрических полей. Создание и исследование таких сред стало особенно актуальным в последнее время в контексте разработок так называемых «умных» материалов, способных контролируемо изменять свои характеристики в широком диапазоне в зависимости от внешних воздействий. Был предпринят ряд попыток создания подобного рода материалов путем введения в магнитную жидкость микрочастиц различных материалов, имеющих разную микрогеометрию [2–5]. В результате были получены среды с изменяющимися в магнитном поле реологическими, оптическими и тепловыми свойствами. Ряд исследований также был посвящен изучению возможности управления электрическими свойствами композитов на основе магнитной жидкости. Так в работе [6] экспериментально исследуется электропроводность магнитной жидкости, содержащей микрочастицы графита. Теоретическое исследование такой среды предпринято в работе [7].

Настоящая работа имеет целью дальнейшее развитие исследований электрических свойств композиционной магнитной жидкости с графитовым наполнителем. По своим электрическим свойствам магнитная жидкость занимает промежуточное положение между проводниками второго рода и диэлектрическими жидкостями и может рассматриваться как жидкий диэлектрик с относительно большими омическими потерями. Графит является естественным полупроводником электронного типа, и его электрическая проводимость значительно превышает проводимость магнитной жидкости. Поскольку размеры микрочастиц графита значительно превос-

ходят размеры магнитных наночастиц магнитной жидкости, то магнитная жидкость в данном случае может рассматриваться как сплошная намагничивающаяся среда, а помещаемые в нее частицы графита в магнитном поле ведут себя как магнитные дырки. При воздействии внешнего магнитного поля микрочастицы графита, находящиеся в магнитной жидкости, приобретают магнитный момент антипараллельный магнитному полю. Благодаря этому происходит ориентация микрочастиц графита и их объединение в цепочечные структуры, выстроенные вдоль магнитного поля. Вследствие значительного различия электрических свойств графита и магнитной жидкости, происходящие в магнитном поле процессы структурообразования приводят к значимому изменению макроскопических электрических свойств такого композита. Это и обуславливает применение в данном случае графитовых микрочастиц для создания материала с управляемыми посредством магнитного поля электрическими характеристиками.

Электрические свойства композиционных материалов вообще [8] и созданных на основе магнитных жидкостей в частности [6, 7] изучены достаточно подробно в существующей литературе. При этом в гораздо меньшей степени исследованы закономерности электрических свойств тонких слоев данных материалов. Если композиционная среда, содержащая проводящие дисперсные частицы, образует относительно тонкую прослойку между поверхностями электродов, ряд особенностей электрических свойств такой системы может быть обусловлен образованием между электродами проводящих «мостов». Подобные явления слабо изучены, однако представляют значительный научный и прикладной интерес. Впервые подобного рода система, в которой при воздействии электрического поля происходило образование проводящих «мостов», исследовалась в работе [9], но дальнейшего развития исследования практически не получили.

В данной работе экспериментально исследуются электрические свойства системы, в которой процессы структурообразования и, в частно-

сти, возникновение проводящих «мостов» происходят под действием магнитного поля и не зависят от электрического. Это позволяет управлять процессом структурообразования и его влиянием на электрические свойства тонкого слоя композита на основе магнитной жидкости, что дает уникальную возможность получения новых результатов, позволяющих глубже раскрыть сущность и закономерности данных явлений.

2. Объект и методы экспериментальных исследований

В экспериментальных исследованиях применялась магнитная жидкость на основе керосина, содержащая наночастицы магнетита размером 10 нм стабилизированные олеиновой кислотой. Плотность магнитной жидкости составляла 1400 кг/м^3 , намагниченность насыщения равнялась 55.4 кА/м , начальная магнитная проницаемость имела значение 5.2 , диэлектрическая проницаемость 4.9 , удельная электрическая проводимость $3.1 \cdot 10^{-6} \text{ См/м}$. Порошок микрочастиц графита был получен путем механического дробления, при этом средний размер частиц составлял $\sim 10 \text{ мкм}$. Плотность применявшегося графита равнялась 1785 кг/м^3 . Некоторое количество порошка добавлялось в магнитную жидкость для получения суспензии с определенным объемным содержанием графита. Затем данная суспензия перемешивалась при помощи ультразвука. Изображение получаемой таким образом суспензии графитовых микрочастиц в магнитной жидкости представлено на рис. 1а. Воздействие внешнего магнитного поля приводило к объединению микрочастиц графита в цепочечные агрегаты, ориентированные вдоль направления поля (рис. 1б).

Далее суспензия помещалась в измерительную ячейку, представлявшую собой два плоских прямоугольных медных электрода размером $27.4 \times 20.6 \text{ мм}$ с расстоянием между ними 200 мкм . Проводились измерения проводимости и емкости такой ячейки. Для этого она подключалась к измерительному мосту переменного тока с частотой измерительного сиг-

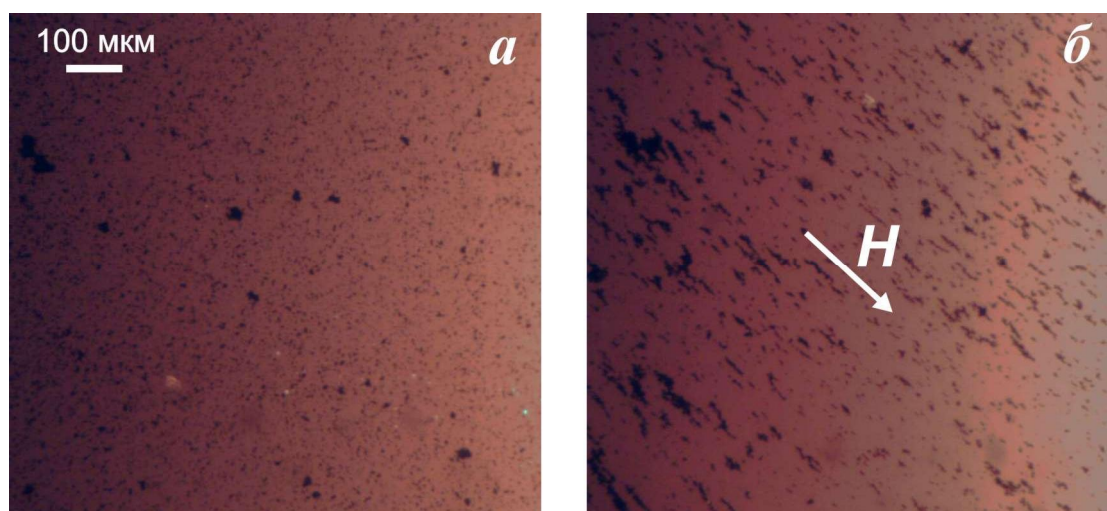


Рис. 1. Суспензия микрочастиц графита в магнитной жидкости в отсутствии магнитного поля (*а*) и при воздействии однородного постоянного магнитного поля, параллельного плоскости рисунка (*б*).

нала 1 кГц. Величина измерительного электрического поля была весьма мала и не влияла на структурное состояние суспензии в ячейке. Для изучения влияния процессов структурообразования в суспензии на электрические параметры ячейки она помещалась между полюсами электромагнита в области однородного магнитного поля. Производились измерения емкости и проводимости ячейки при воздействии внешнего магнитного поля, сонаправленного с измерительным электрическим полем, а также при взаимно перпендикулярной ориентации полей. Измерения проводились при различном объемном содержании графита в магнитной жидкости.

Слой суспензии между электродами ячейки в данных опытах может рассматриваться как тонкий, поскольку его толщина меньше или соизмерима с размерами возникающих в суспензии под действием магнитного поля структурных образований из дисперсных микрочастиц графита. Следует также отметить, что при приготовлении суспензии графита в магнитной жидкости дополнительных стабилизирующих агентов не применялось. Это приводило к седиментации графита и расслоению суспензии с течением времени. Однако, согласно выполненным измерениям, данный процесс приводил к значимому изменению макроскопических свойств суспензии

лишь спустя несколько часов после ее приготовления. На выполнение же электрических измерений затрачивалось порядка нескольких минут. Это позволяет рассматривать суспензию как устойчивую в процессе измерений и пренебречь влиянием седиментации частиц графита на ее свойства.

3. Результаты экспериментальных исследований

При заполнении ячейки исследуемой суспензией величина ее проводимости оказывалась на несколько порядков выше, чем проводимость ячейки заполненной магнитной жидкостью, не содержащей микрочастиц графита. Это свидетельствует о наличии проводящих «мостов» из частиц графита между электродами даже в отсутствии упорядочивающего воздействия внешнего магнитного поля. Действие магнитного поля приводило к изменению измеренных величин проводимости и емкости ячейки, что должно быть результатом перестройки и изменения конфигурации проводящих «мостов» в суспензии.

Так, в частности, при воздействии магнитного поля сонаправленного

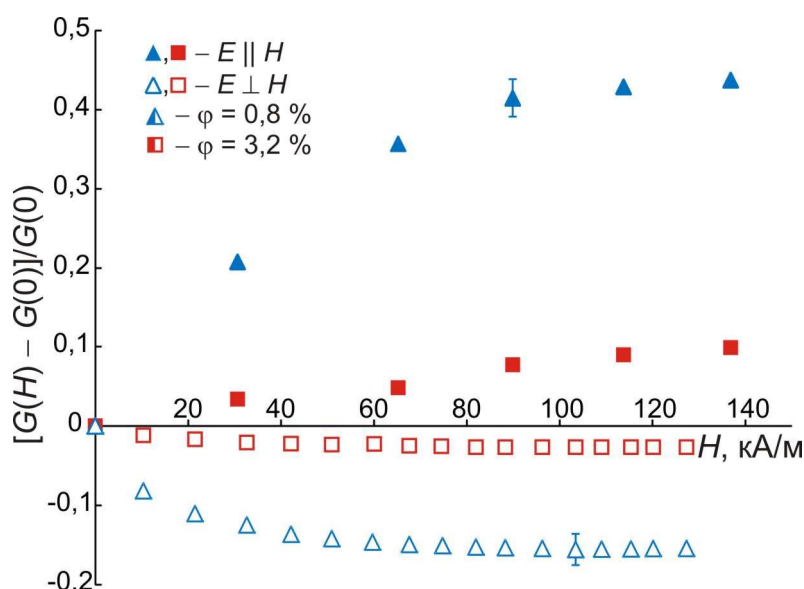


Рис. 2. Зависимости относительного изменения проводимости ячейки от величины напряженности внешнего магнитного поля при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей и при низких концентрациях графита.

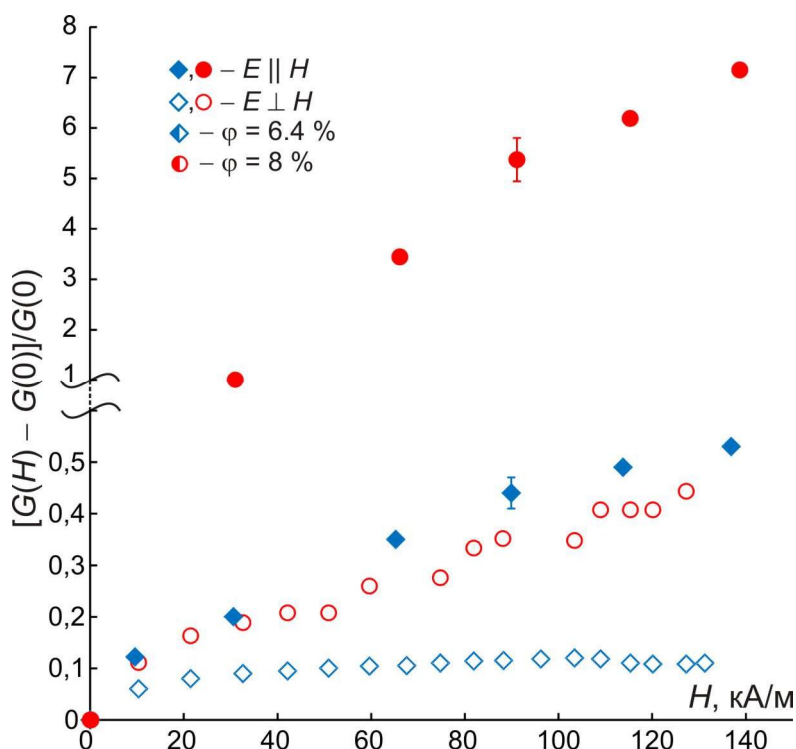


Рис. 3. Зависимости относительного изменения проводимости ячейки от величины напряженности внешнего магнитного поля при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей и при высоких концентрациях графита.

с электрическим измерительным полем наблюдалось возрастание проводимости и емкости ячейки. На рис. 2 и 3 представлены полученные экспериментальные зависимости относительного изменения проводимости ячейки, вызванного действием поля, от величины напряженности внешнего магнитного поля H , при различных значениях объемной концентрации графита j . Как видно из рисунков, с увеличением напряженности магнитного поля проводимость ячейки нелинейно возрастает, стремясь к насыщению при высоких значениях напряженности. Аналогичный характер имеют и полученные зависимости относительного изменения емкости ячейки от величины магнитного поля, параллельного электрическому полю. Данные зависимости представлены на рис. 4 и 5. Это должно свидетельствовать о том, что в данном случае имеет место упорядочивание проводящих «мостов» между электродами и увеличение их количества. Как видно из рисунков, относительное изменение проводимости и емкости

ячейки под действием поля тем значительнее, чем выше концентрация графита.

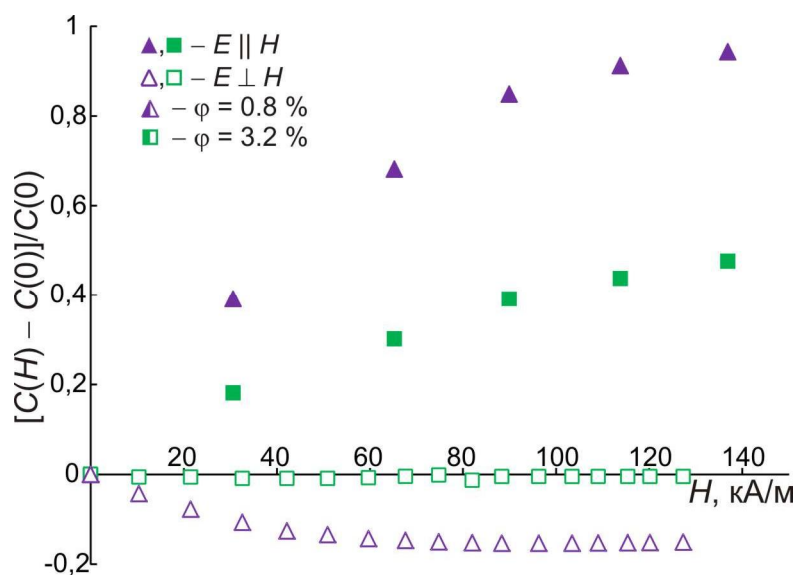


Рис. 4. Зависимости относительного изменения емкости ячейки от величины напряженности внешнего магнитного поля при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей и при низких концентрациях графита.

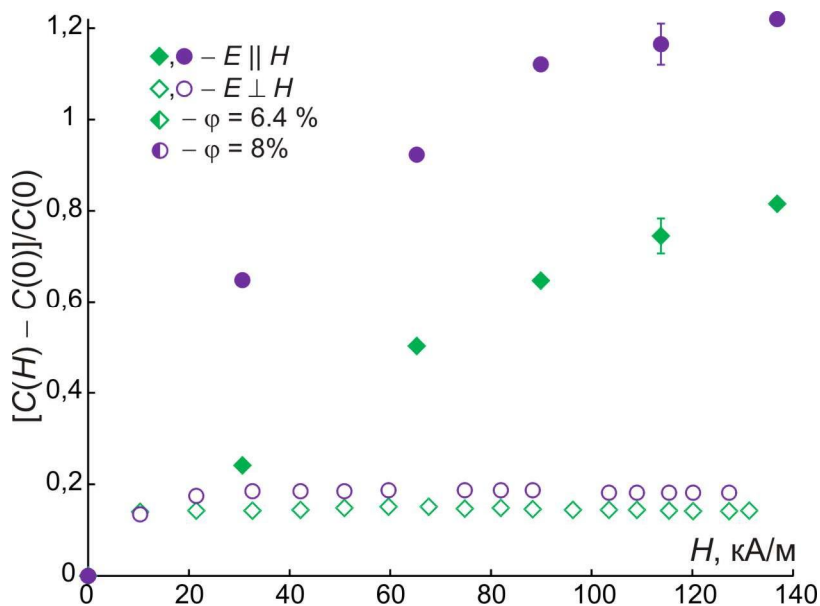


Рис. 5. Зависимости относительного изменения емкости ячейки от величины напряженности внешнего магнитного поля при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей и при высоких концентрациях графита.

Иной характер имеют зависимости проводимости и емкости ячейки в случае, когда внешнее магнитное поле перпендикулярно электрическому измерительному полю. При малых концентрациях графита в этом случае наблюдается убывание проводимости и емкости ячейки с увеличением напряженности магнитного поля (рис. 2 и 4), что свидетельствует об

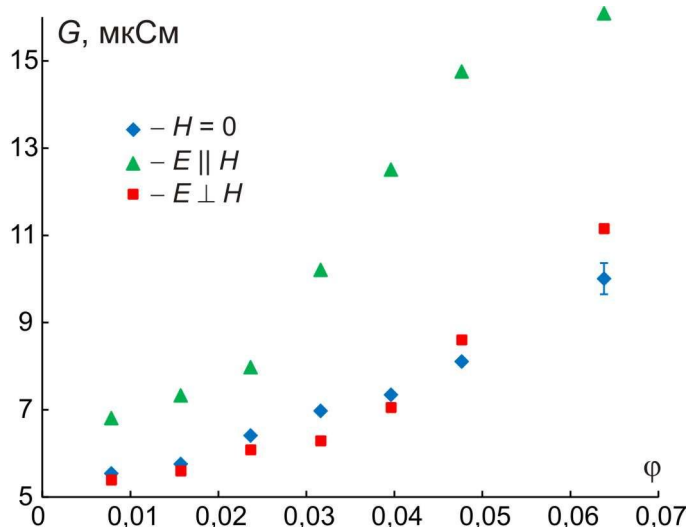


Рис. 6. Зависимость проводимости ячейки от объемной концентрации графита в отсутствии магнитного поля, в параллельных электрическом и магнитном полях ($H = 230$ кА/м), а также в перпендикулярных электрическом и магнитном полях ($H = 88$ кА/м).

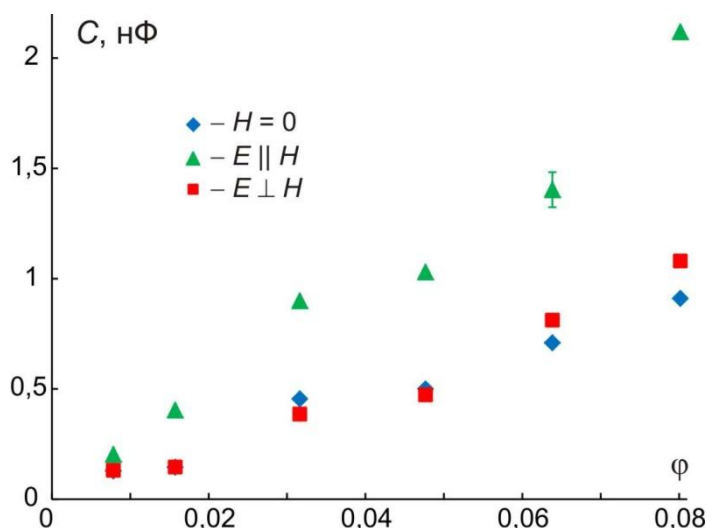


Рис. 7. Зависимость емкости ячейки от объемной концентрации графита в отсутствии магнитного поля, в параллельных электрическом и магнитном полях ($H = 230$ кА/м), а также в перпендикулярных электрическом и магнитном полях ($H = 88$ кА/м).

ослаблении контакта между электродами посредством проводящих «мостов». В случае же больших концентраций графита воздействие перпендикулярного магнитного поля вновь приводит к возрастанию проводимости и емкости ячейки, которое, однако, гораздо менее выражено, чем в случае параллельных полей, и быстро выходит на насыщение с ростом напряженности магнитного поля. Соответствующие экспериментальные зависимости представлены на рис. 3 и 5.

Также были проведены измерения зависимостей проводимости и емкости ячейки от объемной концентрации графита в магнитной жидкости. В отсутствии внешнего магнитного поля проводимость и емкость ячейки ожидаемо возрастают с ростом концентрации графита (рис. 6 и 7), что свидетельствует об увеличении числа межэлектродных контактов. При дополнительном действии внешнего магнитного поля, параллельного измерительному электрическому полю, концентрационные зависимости проводимости и емкости ячейки ложатся выше соответствующих зависимостей, полученных в отсутствии поля (рис. 6 и 7), что согласуется с фактом возрастания данных величин в параллельных полях.

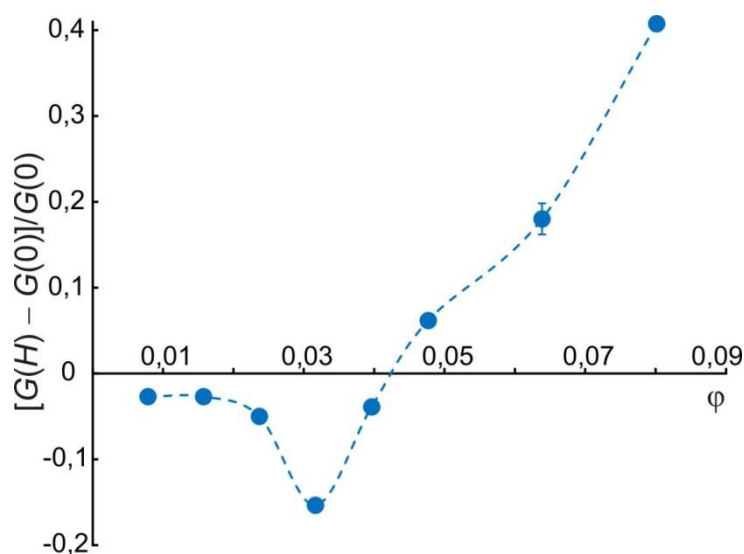


Рис. 8. Концентрационная зависимость относительного изменения проводимости ячейки, вызванного действием магнитного поля $H = 88$ кА/м, направленного перпендикулярно измерительному электрическому полю.

При воздействии магнитного поля, перпендикулярного электрическому, концентрационная зависимость емкости ячейки с учетом погрешностей измерения практически совпадает с соответствующей зависимостью, полученной в отсутствии магнитного поля (рис. 7). Однако зависимость проводимости от концентрации магнетита в перпендикулярном магнитном поле заметно отличается от соответствующей зависимости в отсутствии поля. При низких концентрациях зависимость, полученная в перпендикулярном поле, ложится ниже зависимости, соответствующей отсутствию магнитного поля, при больших же концентрациях она проходит выше последней (рис. 6). Этот факт согласуется с представленными выше зависимостями проводимости ячейки от величины поля при разных значениях концентрации и наглядно иллюстрируется рисунком 8, где показана зависимость относительного изменения проводимости ячейки, вызванного действием магнитного поля, от концентрации графита.

4. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований был получен ряд новых результатов, касающихся электрических свойств композиционных дисперсных сред и их тонких слоев, обусловленных протекающими в них процессами структурообразования и возникновения проводящих «мостов». Получены зависимости проводимости и емкости ячейки, заполненной суспензией графитовых микрочастиц в магнитной жидкости, от величины и направления внешнего магнитного поля, а также от концентрации графита. На основании полученных результатов можно заключить, что электрические параметры данной системы в ряде случаев могут изменяться более чем на порядок под действием магнитного поля. Данный факт представляет собой существенный результат и может найти практическое применение в работах по синтезу новых функциональных материалов, а также при создании управляемых электротехнических модулей.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-02-90019-Бел_а), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ведомственной аналитической научно-технической программы «Развитие научного потенциала высшей школы».

Литература

1. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 387 с.
2. Popplewell J., Rosensweig R.E. Magnetorheological fluid composites // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. – Vol. 29. – P. 2297–2303.
3. Dikansky Yu.I., Veguera J.G., Suzdalev V.N., Smerek Yu.L. Magnetic fluids with non-magnetic inclusions of various shapes // *Magnetohydrodynamics*. 2002. – Vol. 38, – No. 3. – P. 281–285.
4. Lopez-Lopez M.T., Kuzhir P., Laciš S., Bossis G., Gonzalez-Caballero F., Duran J.D.G. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2006. – Vol. 18. – S2803.
5. Helgesen G., Svasand E., Skjeltop A.T. Nanoparticle induced self-assembly // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2008. – Vol. 20. – 204127.
6. Диканский Ю.И., Вегера Ж.Г., Смерек Ю.Л., Аксенов А.В. Особенности электропроводности и теплопроводности магнитного нанокolloида с мелкодисперсным немагнитным наполнителем // *Нанотехника*. 2009. – № 18. – С. 20–24.
7. Закинян Р.Г., Смерек Ю.Л., Закинян А.Р. К механизму электропроводности магнитной жидкости с графитовым наполнителем // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2004. – № 3. С. 52–55.
8. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев: Наукова думка, 1975. 246 с.
9. Гиндин Л.Г., Френкель Я.И., Шпанская О.А. Образование проводящих «мостиков» в суспензиях проводников или полупроводников в диэлектриках // *Журнал технической физики*. 1950. – Т. 20, – вып. 8. – С. 937–943.