

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СРЕД ДЛЯ ЕМКОСТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Д.О. Зятков, А.В. Юрченко, В.Б. Балашов, В.И. Юрченко

*В статье представлены результаты экспериментального исследования чувствительных элементов емкостных датчиков магнитного поля с разным магнитным наполнителем. Действие датчика основано на изменении емкости конденсатора с магнитным наполнителем от величины магнитного поля. Изучается влияние внешнего магнитного поля на чувствительный емкостной элемент с магнитной жидкостью наполненной различными частицами. Показано изменение емкости пластинчатого конденсатора от величины магнитного поля в зависимости от процессов цепочного структурообразования.*

*Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное поле, емкостной чувствительный элемент, цепочечные агрегаты.*

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости представляют собой взвесь наночастиц ферромагнетиков в жидкой основе (керосин, вода, минеральные и кремнийорганические масла и т. д.) [1]. Магнитные свойства феррожидкости обуславливаются содержанием твердой магнитной составляющей, которая может достигать 25 объемных процентов объема. Магнитная проницаемость ферромагнитных жидкостей на несколько порядков выше, чем у гомогенных парамагнитных жидкостей и ее значение может достигать нескольких десятков. Величина магнитной проницаемости зависит от размера частиц и их объемной концентрации. Однако, с увеличением размера частиц нарушается седиментационная устойчивость из-за слипания частиц за счет их большого магнитного момента и нарушается условие однодоменности. В магнитных жидкостях с малыми частицами размером примерно 10 нм возникает вероятность тепловых флуктуаций при сохранении в них самопроизвольной намагниченности [2]. В случае, когда энергия магнитного поля меньше энергии теплового движения частиц, тепловое движение препятствует выстраиванию магнитных моментов вдоль поля [3]. Для устранения механизма укрупнения частиц за счет их слипания в коллоид вводится определенное количество стабилизатора – поверхностно-активного вещества (ПАВ).

Намагниченность магнитной жидкости зависит от объемной концентрации магнитных частиц, величины магнитного момента частицы, приложенного внешнего поля и энергии теплового движения.

Наравне с магнитными свойствами возрастает интерес исследования электрофизических параметров магнитных жидкостей, для дальнейшего синтеза жидких сред с изменяемыми электрическими свойствами под действием приложенного магнитного поля. Для исследования электрофизических свойств рассматривают электропроводность, диэлектрическую проницаемость, электрическую прочность и тангенс угла диэлектрических потерь [3]. Таким образом, актуальна следующая задача: создание чувствительного емкостного датчика магнитного поля на основе ферромагнитной жидкости с частицами различных размеров и свойств.

### Объект и методы экспериментальных исследований

В экспериментальных исследованиях применялась магнитная жидкость на основе полиметилфенилсилоксана (ПФМС-4), содержащая наночастицы железа размером 100 нм. Магнитная жидкость с частицами карбонильного железа размером 2–5 мкм и с частицами аморфного магнитомягкого сплава дисперсностью менее 200 мкм. Концентрация частиц железа в ПФМС-4 не превышает 15 %.

Далее магнитная жидкость помещалась в измерительную ячейку объемом 0,5 см<sup>3</sup>. Было изготовлено две измерительных ячейки, первая из металлического корпуса с диэлектрическим дном и гибкими выводами, вторая из пластмассы и гибкими выводами. Внутри корпуса располагались медные обкладки площадью  $S = 10 \text{ мм}^2$  на расстоянии  $d = 3 \text{ мм}$ , которые соединялись с гибкими выводами (рисунок 1).

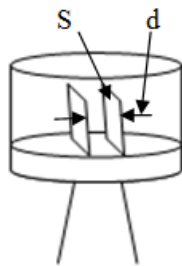


Рисунок 1 – Измерительная ячейка, где  $S$  – площадь медной обкладки,  $d$  – расстояние между обкладками

Проводились измерения емкости такой ячейки с использованием измерителя  $L, C, R$  типа E7-12 на частоте измерительного сигнала 1 МГц. Величина измерительного электрического поля мала и не влияет на состояние суспензии в измерительной ячейке. Для изучения влияния магнитной жидкости на электрические параметры ячейки она подвергалась воздействию внешнего магнитного поля. Измерения проводимости и емкости ячейки проводились при воздействии магнитного поля параллельно и перпендикулярно измерительному электрическому полю. Следует отметить, что при приготовлении магнитной жидкости стабилизирующие агенты (ПАВ) не применялись. Это приводило к седиментации частиц железа и расслоению магнитной жидкости с течением времени. На выполнение измерений затрачивалось несколько минут. Это позволяет рассматривать магнитную жидкость как устойчивую систему в процессе измерений и пренебречь влиянием седиментации частиц на ее свойства.

### Результаты экспериментальных исследований

При заполнении ячейки исследуемой суспензией она подвергалась действию внешнего магнитного поля создаваемого постоянным магнитом. Индукция магнитного поля создаваемого магнитом имеет величину в диапазоне мили Тесла. Действие магнитного поля приводило к изменению емкости ячейки в результате перестройки и структурирования суспензии.

На рисунке 2 изображена зависимость емкости стальной ячейки и пластмассовой ячейки с магнитной жидкостью из карбонильного железа, наножелеза (рисунок 3) дисперсностью 100 нм и аморфного ферромагнетика (рисунок 4) при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей.

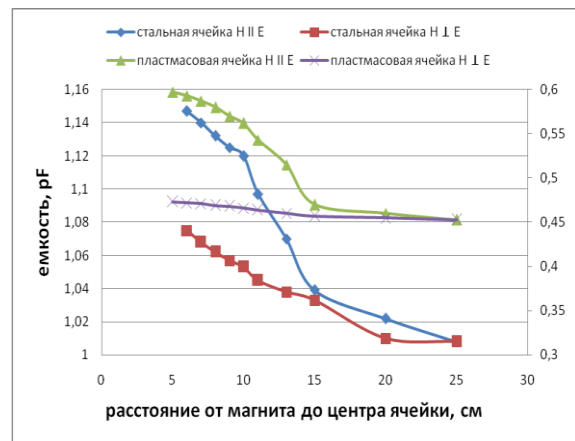


Рисунок 2 – Зависимость емкости ячейки с магнитной жидкостью от расстояния между ячейкой и магнитом при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей, где стальная ячейка по левой оси ординат, а пластмассовая ячейка по правой оси ординат

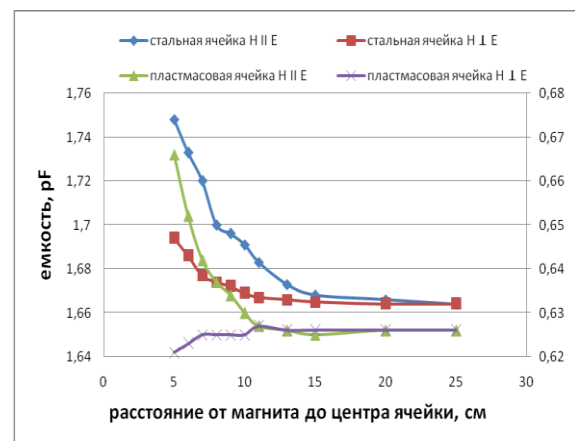


Рисунок 3 – Зависимость емкости ячейки с магнитной жидкостью от расстояния между ячейкой и магнитом при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей, где стальная ячейка по левой оси ординат, а пластмассовая ячейка по правой оси ординат

Частицы аморфного ферромагнетика имеют анизотропную форму в отличие от карбонильного и наножелеза. Поэтому, частицы, имеющие вытянутые (в виде «иголок») или плоские (в виде «дисков») формы, легче поддаются магнитному структурированию, т. е. упорядочению направлений магнитных осей частиц [4]. Но из-за большого размера аморфных частиц седиментация происходит намного быстрее, оказывая влияние на электрические параметры ячейки. Но даже в этом случае ячейка с магнитной жидкостью из аморфных частиц показывает неплохой результат, а именно значительное изменение емкости.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СРЕД ДЛЯ ЕМКОСТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

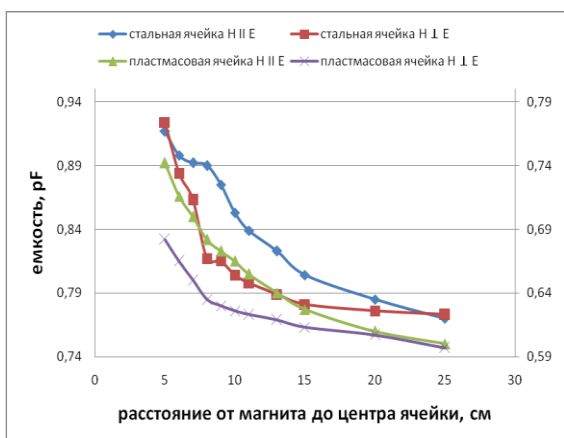


Рисунок 4 – Зависимость емкости ячейки с магнитной жидкостью от расстояния между ячейкой и магнитом при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей, где стальная ячейка по левой оси ординат, а пластмассовая ячейка по правой оси ординат

Из рисунков 2, 3 и 4 представлено относительное изменение емкости ячейки в параллельных (рисунок 5) и в перпендикулярных полях (рисунок 6).

Под действием внешнего магнитного поля на феррожидкость, происходит объединение агрегатов в цепочки, которые выстраиваются вдоль направления поля (рисунок 7).

Процессы агрегирования (структурирования) в магнитной жидкости с разным наполнителем под действием внешнего магнитного поля приводят к изменению электрических параметров измерительной ячейки. В слабых полях в намагниченность феррожидкости для образования цепочечных агрегатов основной вклад вносят крупные частицы. Как видно из рисунки 5, чувствительность и относительное изменение емкости происходит быстрее с частицами аморфного магнитомягкого сплава дисперсностью менее 200 мкм и с частицами карбонильного железа размером 2-5 мкм, чем с частицами железа дисперсностью 100 нм, у которых незначительный вклад в изменение емкости, вследствие их интенсивного броуновского движения. Можно утверждать, что именно с этими процессами связаны обнаруженные в настоящей работе особенности в изменение емкости измерительной ячейки в зависимости от размера частиц. Также учитывали выводы сделанные в статье [5], о потерях в изолирующем диэлектрике и сквозных токов утечки при измерении емкости. В качестве изолирующего диэлектрика использовали полифенилметилсилоксан с объемным сопротивлением  $(0,56-2,1) \cdot 10^{13}$  Ом\*см и  $\text{tg } \delta = 0,00010$ .

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2015

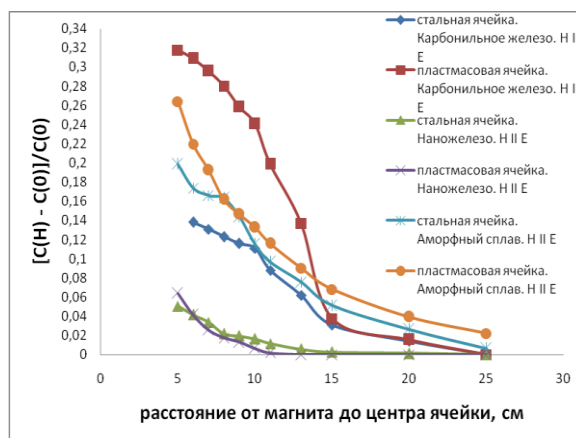


Рисунок 5 – Относительное изменение емкости ячейки в параллельных полях

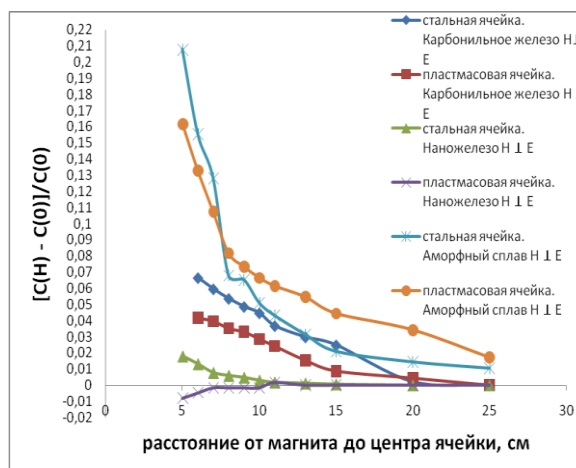
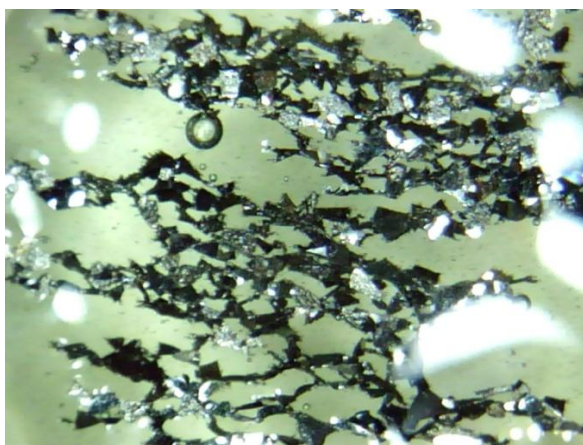


Рисунок 6 – Относительное изменение емкости ячейки в перпендикулярных полях

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

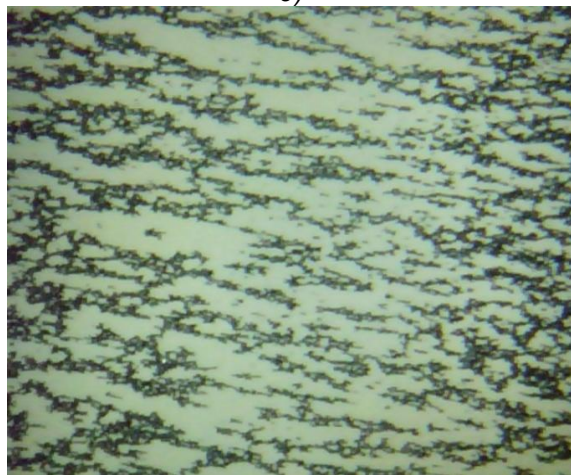
Проведенные экспериментальные исследования показали, что изменения емкости ячейки с магнитной жидкостью от величины магнитного поля обусловлено протекающими в них процессами структурообразования и размерами частиц. Из зависимости емкости ячейки заполненной магнитной жидкостью с разным наполнителем от величины и направления внешнего магнитного поля видно, что электрические параметры данной ячейки изменяются на порядок под действием магнитного поля, то есть показывают значительную чувствительность к изменению магнитного поля. В дальнейшем планируется провести измерение чувствительности емкостного датчика по магнитной индукции и исследовать предельную чувствительность датчика в слабых полях.



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Магнитная жидкость с разным наполнителем под действием магнитного поля направленного горизонтально плоскости рисунка, где а – частицы аморфного магнитомягкого сплава дисперсностью менее 200 нм, б – частицы железа дисперсностью 100 нм, в – частицы карбонильного железа размером 2–5 мкм

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блум, Э. Я. Магнитные жидкости / Э. Я. Блум, М. М. Майоров, А. О. Цеберс. – Рига. : Зинатне, 1989. – 387 с.
2. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М. : Наука, 1971. – 1032 с.
3. Закинян, А. Р. Магнитные и электрические свойства магнитных эмульсий / А. Р. Закинян, Ю. И. Диканский. – Саарбрюккен. : LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 146 с.
4. Губин, С. П. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С. П. Губин, Ю. А. Кокшаров, Г. Б. Хомутов, Г. Ю. Юрков // Успехи химии. – 2005. – № 74(6). – С. 541–574.
5. Мелентьев, В. С. Метод раздельного определения параметров емкостных датчиков по магнитным значениям переходных процессов / С. В. Мелентьев, О. А. Латухова, Т. С. Евстифеева // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 106–108.

**Зятыков Д.О.** – аспирант кафедры информационно-измерительной техники Томского политехнического университета, [pijpp@inbox.ru](mailto:pijpp@inbox.ru).

**Юрченко А.В.** – д.т.н., Томский политехнический университет, кафедра информационно-измерительной техники, [pijpp@inbox.ru](mailto:pijpp@inbox.ru).

**Балашов В.Б.** – инженер-технолог АО НИИ Полупроводниковых приборов.

**Юрченко В.И.** – начальник 110 отдела, АО НИИ Полупроводниковых приборов, [yurchenko\\_vi@pijpp.ru](mailto:yurchenko_vi@pijpp.ru).