

УДК: 537.632/.636

**ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ С МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ ДЛЯ МАГНИТНОГО  
КОНТРОЛЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
(CAPACITIVE SENSORS WITH A MAGNETIC FLUID FOR MAGNETIC MONITORING  
OF SMALL CHANGES OF THE MAGNETIC FIELD)**

Д. О. Зятыков, А. В. Юрченко, В. Б. Балашов\*, В. И. Юрченко\*\*  
D. Zyatkov, A. Yurchenko\*, V. Balashov\*, V. Yurchenko\*\*

Томский политехнический университет  
\*Томский государственный университет  
\*\*АО «НИИПП», г. Томск  
E-mail: [zyatkov\\_do@mail.ru](mailto:zyatkov_do@mail.ru)

В данной работе показана возможность создания миниатюрного чувствительного датчика с магнитной жидкостью для детектирования и измерения индукции магнитного поля. Действие датчика основано на изменении емкости конденсатора с магнитной жидкостью от величины магнитного поля. Исследуется изменение емкости в зависимости от концентрации магнитного порошка дисперсностью 100 нм между электродами под действием внешнего магнитного поля. Рассмотрена структурная организация магнитных частиц в цепочечные агрегаты при воздействии внешнего магнитного поля. Представлены экспериментальные образцы емкостного чувствительного элемента для датчика магнитного поля и описан эксперимент измерения емкости конденсатора. Установлено, что процессы агрегирования (структурирования) в магнитной жидкости под действием внешнего магнитного поля приводят к изменению диэлектрической проницаемости активного диэлектрика (магнитной жидкости) между пластинами конденсатора. Сделан вывод о том, что существует новый способ детектирования и измерения индукции магнитного поля.

(In this work the possibility of creating of tiny sensitive sensor with magnetic fluid for the detection and measurement of induction of the magnetic field is demonstrated. A sensor based on change of capacity of the condenser with magnetic fluid from the magnitude of a magnetic field. Change of capacity depending on concentration of magnetic particles the size of 100 nanometers between electrodes under the influence of an external magnetic field is investigated. The structural organization of magnetic particles in chain aggregates by effect of an external magnetic field is considered. Experimental samples of a capacitive sensor element for the magnetic field sensor are described. An experiment of measurement of capacity of the condenser is described. The analysis of the results show that the processes of aggregation in the magnetic fluid under the influence of an external magnetic field lead to change of dielectric permeability of active dielectric (magnetic fluid) between condenser plates. In conclude that the new way of detecting and measurement of magnetic induction of a magnetic field is obtained.)

**Ключевые слова:**

Магнитная жидкость, магнитное поле, конденсатор, цепочечные агрегаты, диэлектрическая проницаемость.

(Magnetic fluid, magnetic field, capacitor, chain aggregates, dielectric permeability.)

Магнитные коллоиды (магнитные наножидкости) представляют собой устойчивую коллоидную систему, состоящую из однодоменных магнитных наночастиц, взвешенных в жидком носителе и стабилизированных структурномеханически или электростатически. Основной компонент магнитной жидкости, от которого зависят ее магнитные свойства, дисперсный ферро- или ферримagnetик, ферриты–шпинели, ферриты–гранаты, а так же переходные металлы, железо, кобальт, никель. Магнитные свойства магнитной жидкости определяются объемным содержанием магнитного порошка в жидком носителе. Седиментационная устойчивость частиц в жидком носителе достигается использованием частиц дисперсностью 10 нм [1]. Для агрегативной устойчивости магнитных частиц в магнитной жидкости необходимо, чтобы при сближение частиц появлялись силы отталкивания между ними, что достигается путем введения в коллоид определенного количества стабилизатора – поверхностно-активного вещества (ПАВ). Образованный на поверхности

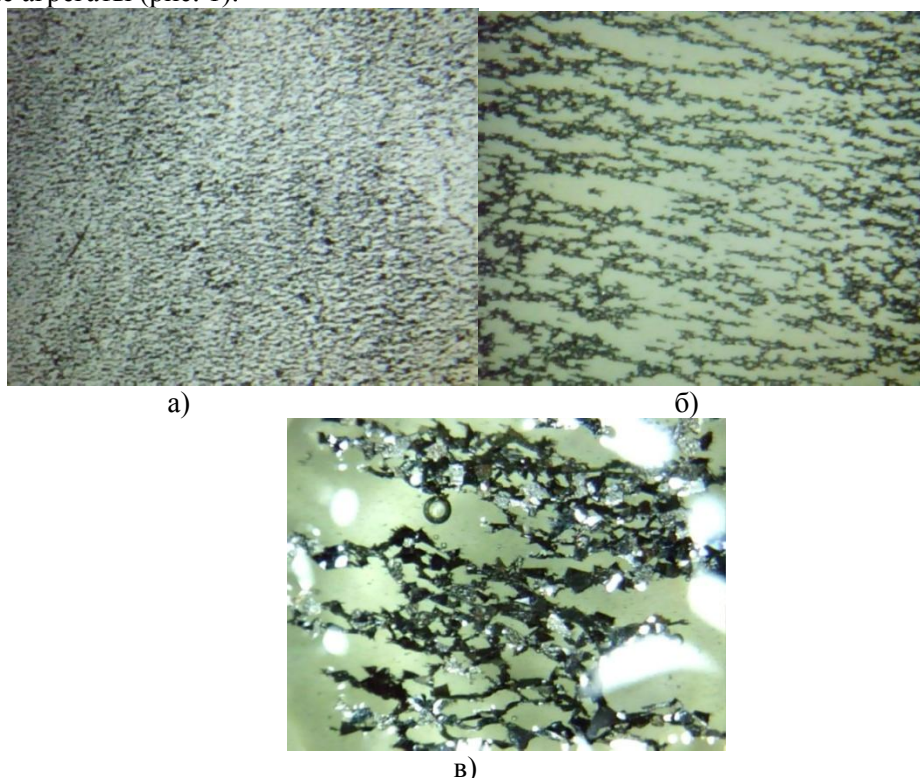
частиц молекулами ПАВ адсорбционный слой создает структурно-механический барьер, препятствующий укрупнению частиц вследствие их слипания. Как правило, в качестве ПАВ используют вещества, строение которых характеризуется наличием короткой функциональной группы (щелочной, кислотной и др.) и длинной хвостовой цепочки (углеводородной, фторуглеродной и др.); классическим стабилизатором для магнитной жидкости является олеиновая кислота [2].

В столь малых частицах при сохранении в них самопроизвольной намагниченности возрастает вероятность тепловых флуктуаций магнитного момента частицы. В результате этого появляется возможность вращения магнитного момента относительно твердой матрицы. Впервые на этот тип вращения магнитного момента было указано Л. Неелем [3], а такие частицы получили название «суперпарамагнитные» [4].

В жидкой среде возможна также вращательная диффузия самих частиц. В этом случае может проявляться броуновский механизм релаксации магнитного момента. Преобладание того или иного механизма релаксации зависит от соотношения времен релаксации Нееля и вращательной диффузии.

Ряд магнитных свойств магнитной жидкости определяются размерами, магнитной структурой ферромагнитных частиц, а так же их взаимодействием. Основным средством управления магнитными жидкостями является магнитное поле. В магнитном поле физические свойства магнитных жидкостей (оптические, магнитные, электрические, теплофизические) анизотропны. Процессы установления анизотропии определяются броуновским движением частиц и тепловыми флуктуациями их магнитного момента. Специфика теплофизических явлений в магнитной жидкости связана с зависимостью намагниченности от температуры, концентрации частиц, а также с действием пондеромоторных сил их собственного поля [5].

Физических свойств магнитных жидкостей связаны с магнитодипольным взаимодействием частиц, которое может приводить к процессам агрегирования в таких системах. Таким образом, в магнитной жидкости происходит объединение частиц, образуя цепочечные агрегаты (рис. 1).



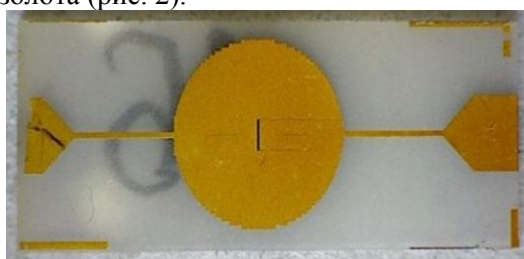
**Рис. 1.** Магнитная жидкость с разным наполнителем под действием магнитного поля направленного горизонтально плоскости рисунка, где а) частицы железа дисперсностью 100 нм, б) частицы карбонильного железа размером 2-5 мкм, в) частицы аморфного магнитомягкого сплава дисперсностью менее 200 мкм

Предполагается, что цепочечные агрегаты, образующиеся в магнитных жидкостях, оказывают существенное влияние на вязкость ферроколлоида и являются одной из основных причин неньютоновской жидкости [6].

Целью настоящей работы является исследование возможности создания миниатюрного чувствительного датчика с магнитной жидкостью для детектирования и измерения магнитной индукции магнитного поля.

Чувствительный элемент представляет собой конденсатор с активным диэлектриком. В качестве активного диэлектрика в нашем случае выступает ферромагнитная жидкость, которая по-разному структурируется в зависимости от индукции и направленности вектора магнитного поля. Обкладки конденсатора выполнены из металлов с высокой электропроводностью.

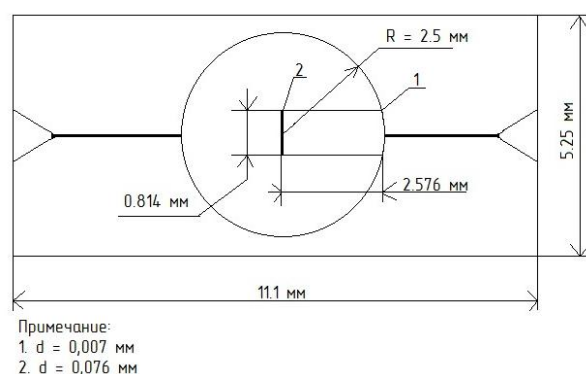
Первый образец чувствительного элемента для датчика магнитного поля представляет собой ситалловую пластину с нанесенной на ее поверхности структурой (конденсатор). Конденсатор выполнен из золота (рис. 2).



**Рис. 2.** Конденсатор на ситалловой пластинке

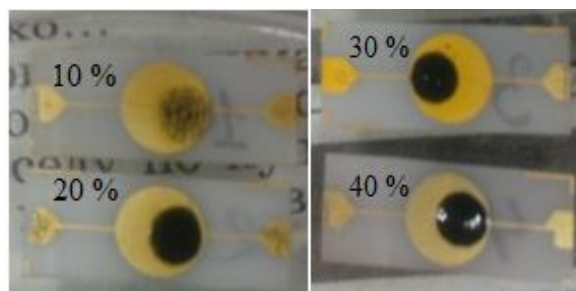
Толщина ситалловой пластины  $h = 470$  мкм. Толщина напыления  $h_{\text{нап}} = 6.21$  мкм.

На рисунке 3 представлена схема конденсатора.



**Рис. 3.** Схема конденсатора

На следующем этапе было изготовлено четыре образца магнитной жидкости с концентрацией магнитного порошка 10%, 20%, 30% и 40%. Магнитная жидкость представляла собой полиметилфенилсилоксан (ПФМС-4) и порошок железа дисперсностью 100 нм. Капля магнитной жидкости наносится на пластину-конденсатор (рис. 4).



**Рис. 4.** Магнитная жидкость с разной концентрацией магнитного порошка на поверхности конденсатора

Однако, стабилизирующий компонент (ПАВ) не использовался, так как на измерение затрачивалось пара минут, поэтому магнитную жидкость можно рассматривать как устойчивую систему в процессе измерений и пренебречь седиментацией частиц.

Емкость полученных сенсорных элементов, с разной концентрацией ферромагнетика в масле, была измерена измерителем 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. Магнитное поле создавалось постоянным магнитом диаметром 17,48 мм и толщиной 1,61 мм. Магнит подносился к торцу конденсатора на расстояние 25 мм. Магнитная индукция магнита на расстоянии 25 мм измерена микротеслометром МТ-10 и составила 150 мкТл. Результаты измерений были занесены в таблицу 1.

**Таблица 1.** Относительное изменение емкости от процентного содержания магнитных частиц

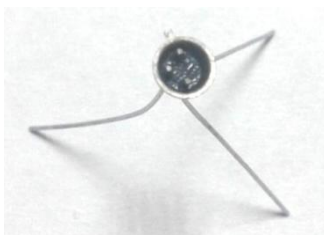
Концентрация, %	10	20	30	40
ΔC, %	1	1.4	5	15.3

Результаты эксперимента показали, что с увеличением концентрации магнитного порошка относительное изменение емкости (ΔC) увеличивается:

$$\Delta C = \frac{C(H) - C(0)}{C(0)}; \quad (1)$$

где ΔC – относительное изменение емкости, C(H) – емкость конденсатора с магнитной жидкостью под действием внешнего магнитного поля, C(0) – емкость конденсатора с магнитной жидкостью без воздействия внешнего магнитного поля.

Второй образец для сравнения с пластинчатым конденсатором использовался корпус транзистора без кристалла (рис. 5).



**Рис. 5.** Корпус транзистора без кристалла

Внутри корпуса нанесли ферромагнитный раствор, аналогичный нанесенному на пластину-конденсатор, с концентрацией железного порошка 10% и 40%. Результаты измерений приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Относительное изменение емкости под действием магнитного поля

магнитное поле	H = 0	H >> 0	H = 0	H >> 0
концентрация магнитного порошка	C <sub>Fe</sub> = 10%	C <sub>Fe</sub> = 10%	C <sub>Fe</sub> = 40%	C <sub>Fe</sub> = 40%
Измерение № 1, pF	0.217	0.199	0.392	0.385
Измерение № 2, pF	0.214	0.205	0.396	0.386
Измерение № 3, pF	0.217	0.200	0.397	0.386
Измерение № 4, pF	0.216	0.199	0.398	0.386
Измерение № 5, pF	0.218	0.201	0.401	0.384
среднее значение, pF	0.216	0.200	0.397	0.381
ΔC, %	7.4		4	

Еще одним альтернативным методом для фиксации магнитного поля, был сенсорный элемент на основе кварцевого капилляра с внутренним диаметром 0,7 мм, расстояние между электродами 3 мм с использованием 40% раствора наночастиц железа в ПФМС-4 (рис. 6).

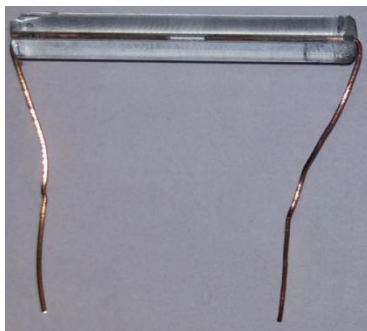


Рис. 6. Стекланный капилляр

Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3. Относительное изменение емкости под действием магнитного поля

магнитное поле	$H = 0$	$H \gg 0$
измерение № 1, pF	0.329	0.226
измерение № 2, pF	0.328	0.280
измерение № 3, pF	0.331	0.260
измерение № 5, pF	0.343	0.260
измерение № 6, pF	0.341	0.230
среднее значение, pF	0.334	0.251
$\Delta C, \%$	24.8	

Процессы агрегирования (структурирования) (рис.1) в магнитной жидкости под действием внешнего магнитного поля приводят к изменению электрических параметров измерительной ячейки. Как известно, емкость любого конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости среды между обкладками. При действии магнитного поля на емкостной чувствительный элемент с ферромагнитной жидкостью в ферромагнитной жидкости происходит объединение частиц в цепочечные агрегаты вследствие взаимодействия магнитных моментов и выстраивание их определенным образом вдоль вектора магнитного поля. В результате изменяется диэлектрическая проницаемость активного диэлектрика (магнитной жидкости) между пластинами конденсатора.

По результатам экспериментального исследования можно сделать вывод, что получен новый способ детектирования и измерения магнитной индукции магнитного поля. Показано, что емкостные ячейки с магнитной жидкостью чувствительны к внешнему магнитному полю вследствие ориентации магнитных частиц и их взаимодействия. В дальнейшем планируется использовать частицы различных размеров и свойств для увеличения чувствительности емкостного элемента для датчика магнитного поля и исследовать предельную чувствительность датчика в слабых полях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блум Э. Я., Майоров М. М., Цеберс А. О. Магнитные жидкости. – Рига.: Зинатне, 1989. – 386 с.
2. Закинян, А. Р., Диканский Ю. И. Магнитные и электрические свойства магнитных эмульсий – Саарбрюккен.: LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 146 с.
3. Neel L. Influence des fluctuations thermiques sur l'aimantation de grains ferromagnetiques tres fins// Academic des sciences. Comptes rendus. – 1949. – Vol. 228. – N 8. – P. 1927–1937.
4. Bean C.P. Hysteresis loops of mixtures of ferromagnetic micropowdes // Journal of Applied Physics. – 1955. - Vol.26. – N 11. – P. 1381–1383.
5. Вонсовский, С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

6. Канторович С. С. Цепочечные агрегаты в полидисперсных магнитных жидкостях: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Екатеринбург, 2004. – 175 с.

**Сведения об авторах:**

**Зятыков Д. О.:** г. Томск, аспирант Института неразрушающего контроля ТПУ. Область научных интересов: электромагнитные поля, электрофизика магнитных жидкостей, датчики.

**Юрченко А. В.:** г. Томск, д-р техн. наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ, руководитель направления солнечной энергетики. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

**Балашов В. Б.:** г. Томск, инженер-технолог ОАО НИИ Полупроводниковых приборов. Область научных интересов: полупроводниковая электроника.

**Юрченко В. И.:** г. Томск, начальник 110 отдела ОАО НИИ Полупроводниковых приборов. Область научных интересов: СВЧ электроника, методы и приборы контроля материалов и изделий, системы технического зрения, датчики.