

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

---

Физический факультет

Кафедра магнетизма

**Электрические свойства магнитоэологических  
эластомеров**

Дипломная работа  
студента 619 группы  
Хайруллина М.Ф.

**Научный руководитель:**  
доктор физ.- мат. наук  
профессор Перов Н. С.

Допущен к защите  
\_\_\_\_\_ декабря 2013 года  
И.о.зав. кафедрой магнетизма  
профессор Перов Н.С.

Москва 2013г.

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Литературный обзор.....	4
1.1.    Магнитореологические материалы.....	4
1.2.    Изготовление МР материалов.....	5
1.3.    Механические свойства МР эластомеров.....	6
1.4.    Диэлектрические свойства МР эластомеров.....	13
Глава 2. Исследуемые образцы и их описание.....	15
Глава 3. Методика исследования.....	17
3.1. Методика измерения диэлектрической проницаемости образцов.....	17
3.2. Методика измерения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения.....	18
3.3. Методика изучения влияния внешнего электрического поля на магнитные свойства МРЭ..	18
Глава 4. Описание полученных результатов и их обсуждение.....	19
4.1. Результаты исследования образцов второго типа из FeNdB с матрицами различной жесткости.....	20
4.2. Результаты исследования МРЭ третьего типа из одного полимера с различными магнитными частицами.....	23
4.4. Результаты исследования МРЭ первого типа из Fe с различными концентрациями.....	26
4.5. Результаты исследования МРЭ четвертого типа из Fe и FeNdB с различными концентрациями.....	29
4.6. Результаты измерения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения МРЭ четвертого типа из Fe и FeNdB с различными концентрациями.....	39
4.7. Результаты исследования влияния электрического поля на магнитные свойства МРЭ четвертого типа из Fe и FeNdB с различными концентрациями.....	41
Глава 5. Заключение.....	42
Список литературы.....	45

## **Введение**

Магнитореологические материалы – это так называемые «умные» материалы, способные быстро и обратимо изменять свои физические свойства под действием внешнего магнитного поля. Наиболее широкое распространение получили МР жидкости и МР эластомеры. Их механические свойства уже очень хорошо изучены: они способны изменять свои параметры (вязкость, упругость, модуль сдвига) под действием внешнего магнитного поля. Благодаря этому МР материалы нашли широкое применение в различных демпфирующих устройствах и автомобилестроении.

МР материалы представляют собой слабомагнитную матрицу (жидкость, полимер, гель и т.д.), в которую добавлены магнитные частицы. Поэтому при изучении МР материалов следует учитывать не только свойства матрицы, но и дипольное взаимодействие между этими магнитными частицами. Внешнее магнитное поле способно действовать на величину этого взаимодействия между частицами, тем самым меняя свойства всего образца.

В недавнем времени было обнаружено, что под действием внешнего магнитного поля меняются не только механические параметры МР эластомеров, но и диэлектрическая проницаемость. Это явление открывает широкие просторы для дальнейшего изучения МР эластомеров и возможности применения их в новых устройствах.

Целью данной работы является изучение влияния внешнего магнитного поля на электрические свойства магнитореологических эластомеров.

# Глава 1. Литературный обзор

## 1.1. Магнитореологические материалы

Магнитореологические материалы – это так называемые «умные» материалы, способные быстро и обратимо изменять свои физические свойства под действием внешнего магнитного поля. Они могут быть использованы в различных устройствах или в качестве составляющего компонента нового материала, требующих управления параметрами в режиме реального времени [1], [2].

Магнитореологические материалы состоят из дио- или паро-магнитной матрицы, в которую включены ферромагнитные частицы. В зависимости от типа матрицы различают магнитореологические жидкости, гели, пены и эластики (магнитоэластики).

**Магнитореологические жидкости** состоят из ферромагнитных или ферримагнитных частиц, помещенных в слабомагнитную жидкость [3]. В качестве слабомагнитных жидкостей используют нефтяные масла, минеральные и силиконовые масла, воду, синтетическое гидрокарбонное масло и другие. Размеры частиц от  $10^{-7}$  м и до  $10^{-5}$  м. Большие размеры частиц приводят их к осаждению в жидкости. Под действием внешнего магнитного поля магнитные частицы выстраиваются в цепочки, направленные вдоль линий приложенного магнитного поля [4]. Взаимодействие частиц в этих цепях зависит от величины приложенного магнитного поля: в слабом поле эти цепи легко разорвать, в сильном – тяжело. Также сила взаимодействия частиц зависит от величины намагниченности насыщения. У железа самое большое значение намагниченности насыщения (2,1 Тл), поэтому для изготовления магнитореологических жидкостей используют именно железные частицы. Частицы микрометрового размера содержат в себе порядка сотен доменов.

Благодаря возможности изменения под действием внешнего магнитного поля таких параметров МР жидкости, как текучесть и сдвиговые свойства, МР жидкости нашли широкое применение в различных демпфирующих устройствах [1], [5].

**Магнитореологические эластомеры и гели** состоят из магнитных частиц, помещенных в полимерную матрицу или гель [6]. Благодаря этому эти образцы обладают упругими свойствами, и магнитные частицы не осаждаются в матрице, в отличие от МР жидкостей. Внешнее магнитное поле способно влиять на магнитные частицы образцов, что приводит к обратимому изменению упругих и реологических свойств материалов. При изучении

упругих свойств магнитореологических материалов следует учитывать как упругие свойства матрицы (полимер или геля), так и взаимодействие магнитных частиц образца. В МР материалах присутствуют дипольное магнитное взаимодействие магнитных частиц и взаимодействие внешнего магнитного поля с магнитными частицами образца. Для структуры магнитных частиц с собственным магнитным моментом в матрице энергетически выгоднее выстраиваться в столбчатые структуры. При деформации образца происходит смещение слоев магнитных частиц, что приводит к переходу системы к энергетически менее выгодному состоянию. Это приводит к увеличению приложенной работы. С помощью внешнего магнитного поля возможно менять силу взаимодействия магнитных частиц в материале, что приводит к зависимости величины приложенной работы от внешнего магнитного поля.

## **1.2. Изготовление МР материалов**

### **МР жидкости**

Для изготовления МР жидкостей используют магнитные частицы, например, из Fe, FeNdB, магнетита, гематита. Размеры частиц обычно от  $10^{-7}$  м и до  $10^{-5}$  м. В качестве слабомагнитных жидкостей используют нефтяные масла, минеральные и силиконовые масла, воду, синтетическое гидрокарбонное масло и другие [7]. Чтобы предотвратить слипание магнитных частиц в жидкости, частицы покрывают ПАВ (например, олеиновая кислота, гидроксид тетраметиламмония). Благодаря этому частицы не образуют тяжелые кластеры, способные осесть под действием силы тяжести.

Использование различных слабомагнитных жидкостей, магнитных частиц разной конфигурации и ПАВ позволяет получать МР жидкости с различными свойствами.

### **МР эластомеры**

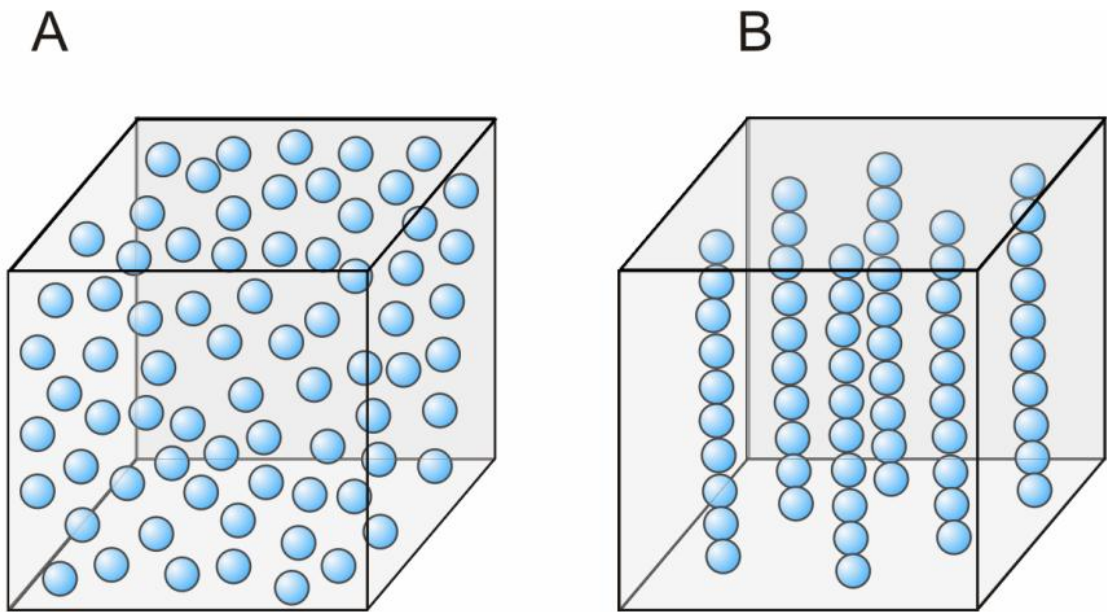
Магнитореологические эластомеры изготавливают из полимерных матриц, в которые добавлены магнитные частицы. В качестве магнитных частиц используют Fe, FeNdB, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. В качестве полимерной матрицы используют натуральные и синтетические резины [8], силикон [9], полиуретан и другие материалы. Использование полимерных матриц с различными свойствами и магнитных частиц разной конфигурации позволяет получать МР эластомеры с различными свойствами.

Если в процессе полимеризации на образец не оказывать внешнего воздействия, то магнитные частицы будут распределены в веществе равномерно и получится изотропный МР эластомер [10]. Если же создать внешнее магнитное поле, то в процессе полимеризации образуется МР эластомер с анизотропией: магнитные частицы в полимеры выстраиваются в столбчатые структуры вдоль направления внешнего магнитного поля [11].

### **1.3. Механические свойства МР эластомеров**

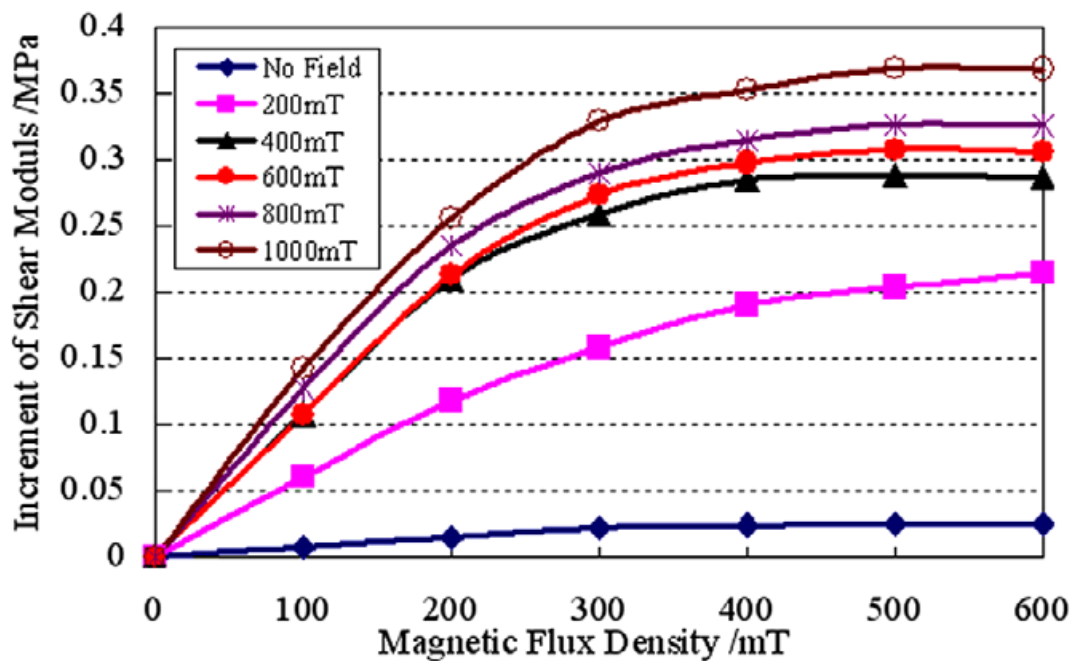
Влияние внешнего магнитного поля на упругие свойства МР эластомера было обнаружено давно. Для описания упругих свойств материала используют модуль сдвига. Модуль сдвига МР эластомера зависит как от упругих свойств полимерной матрицы, так и от силы взаимодействия магнитных частиц между собой. Внешнее магнитное поле способно увеличивать силу взаимодействия магнитных частиц, благодаря чему модуль сдвига материала в магнитном поле может увеличиться. Так в работе [12] показано увеличение модуля сдвига на 60% от значения без магнитного поля. При этом, если величина магнитного поля меньше значения насыщения, то модуль сдвига увеличивается пропорционально величине приложенного магнитного поля [12]. Величина изменения модуля сдвига от внешнего магнитного поля зависит от конфигурации МР эластомера. На это влияют вид, размер, форма магнитных частиц; параметры самой полимерной матрицы, наличие анизотропии в образцах [13], [14]. В своей работе X. L. Gong и др. [15] исследовали гигантское увеличение модуля сдвига: включение магнитного поля величиной 10 кЭ привело к увеличению модуля сдвига для МР эластомера на основе натуральной резины на 130%, а на основе силиконовой резины – на 878%.

Если при изготовлении МР эластомера его поместить во внешнее магнитное поле, то получится образец с анизотропией. Под действием внешнего магнитного поля магнитные частицы выстраиваются в столбчатые структуры вдоль направления магнитного поля (**Рис. 1**). Однако величина магнитного поля должна быть большой (около 10 кЭ), поэтому изготовление анизотропных МР эластомеров трудоемко [9].



**Рис. 1** Схематическое расположение магнитных частиц в полимерной матрице изотропного (А) и анизотропного (В) МР эластомеров.

На **Рис. 2** изображен график зависимости величины увеличения модуля сдвига анизотропного МР эластомера от величины приложенного внешнего магнитного поля [13]. Таким образом, анизотропия МР эластомеров приводит к увеличению зависимости модуля сдвига от внешнего магнитного поля.

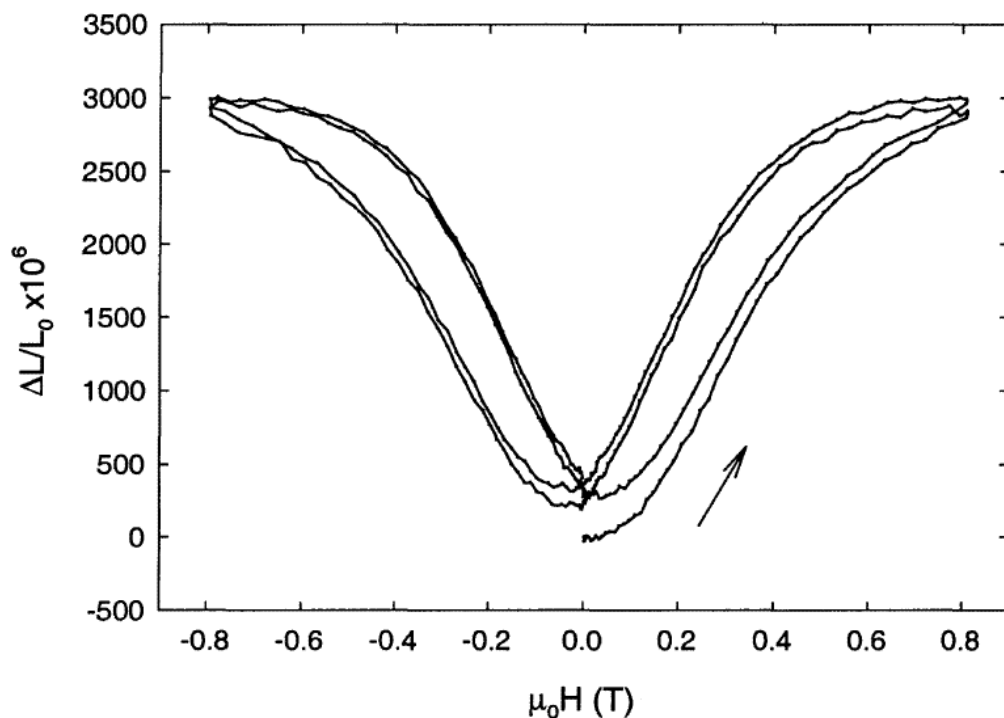


**Рис. 2** График зависимости величины увеличения модуля сдвига анизотропного МР эластомера от величины приложенного внешнего магнитного поля [13]

Под действием внешнего магнитного поля меняется не только модуль сдвига, но и модуль упругости. В работе [16] M. Farshad и др. показали, что наличие магнитных частиц в полимере приводит к увеличению модуля упругости на 30% по сравнению с полимером без частиц. При этом включение внешнего магнитного поля позволяет увеличить модуль упругости МР эластомера в 2 раза.

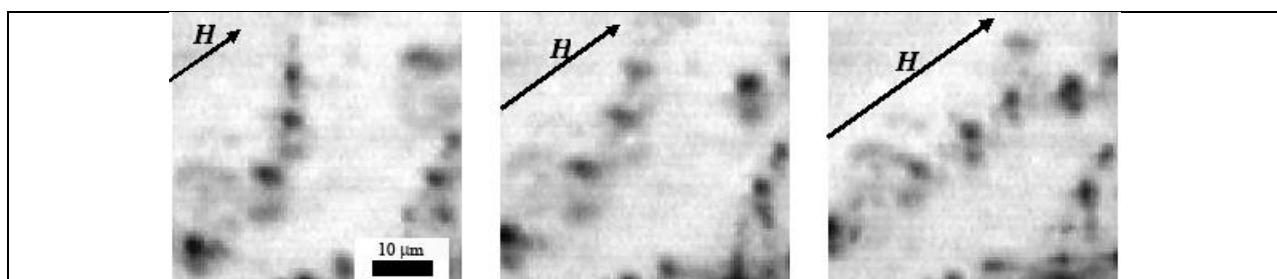
Под действием внешнего магнитного поля магнитные частицы стремятся выстроиться в цепочки вдоль направления внешнего поля. Но из-за упругости матрицы этого не происходит: магнитные частицы лишь смещаются внутри полимерной матрицы. Это смещение частиц приводит к изменению формы всего образца МР эластомера, называемому магнитострикцией МР эластомера. Однако нужно отметить, что изменение формы образца не связано с явлением магнитострикции в магнитных частицах, а связано с изменением расположения магнитных частиц внутри полимерной матрицы. В своей работе [17] J.M. Ginder и др. провели исследование магнитострикции МР эластомеров. Измерения очень малых изменений длины удобно проводить с помощью измерения емкости конденсатора [18]. Однако этот метод трудно реализовать для МР эластомеров, поскольку трудно обеспечить надежный контакт образца с обкладками конденсатора и образец обычно бывает не плоским. Для измерения изменения длины МР эластомера под действием внешнего магнитного поля они использовали дилатометр [18]. Из МР эластомера был изготовлен цилиндрический образец, перед измерением его подвергли внешнему напряжению в 100кПа. Магнитное поле величиной 8 кЭ прикладывалось вдоль оси цилиндра. Изменение длины образца под действием магнитного поля составляло 0,3% от первоначальной длины. Для сравнения, величина магнитострикции железа в 1000 раз меньше. На **Рис. 3** показан график зависимости величины относительного изменения длины образца от величины приложенного магнитного поля. Наблюдаемый гистерезис вызван не магнитным гистерезисом, присутствующим в железных частицах образца, а эластичными особенностями МР эластомеров. В своей работе [19] S. Bednarek наблюдал гигантскую магнитострикцию МР эластомера в поле 80 кЭ: величина относительного изменения длины образца доходила до 1% .





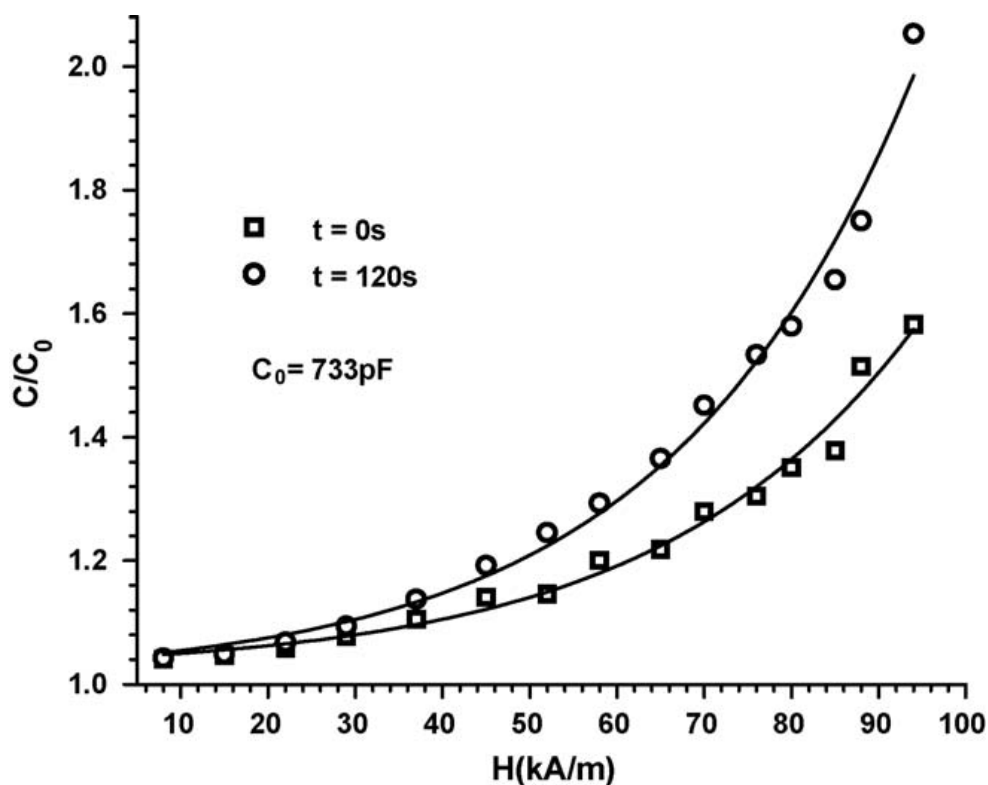
**Рис. 3** График зависимости величины относительного удлинения МР эластомера от величины приложенного магнитного поля [17].

В своей работе [20] G. V. Stepanov и др. изучили смещение магнитных частиц в полимерной матрице под действием внешнего магнитного поля. Для исследования они изготовили изотропный и анизотропный (в поле 800 Э) образцы из силиконового каучука, в качестве магнитных частиц использовали частицы карбонильного железа. За частицами в полимере наблюдали с помощью металлографического микроскопа. Магнитное поле в 2-3 кЭ прикладывалось перпендикулярно направлению наблюдения. Было обнаружено, что внешнее магнитное поле вызывает смещение магнитных частиц внутри полимерной матрицы. При этом частицы стремятся выстроиться вдоль направления магнитного поля (**Рис. 4**). Этот процесс обратим, поэтому при выключении магнитного поля частицы возвращаются в первоначальное положение.



**Рис. 4** Изображения среза МР эластомера при различных значениях величины внешнего магнитного поля. Черные точки – магнитные частицы в полимерной матрице. Стрелкой обозначено направление магнитного поля [20].

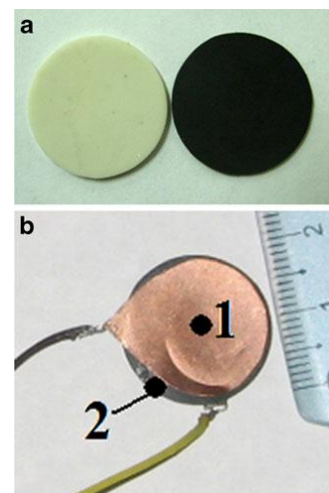
I. Vica и др. [21] провели исследование плоских конденсаторов, заполненных МР эластомером. Для своих экспериментов они изготовили изотропный МР эластомер в виде плоской полоски толщиной порядка 1,5 мм. К этой полоске с разных сторон были приклеены алюминиевые пластины – обкладки конденсатора длиной 6,5 см и шириной 5 см. При внесении измерительного конденсатора с образцом в магнитное поле происходит изменение емкости конденсатора. Авторы связывают это изменение емкости с изменением расстояния между обкладками конденсатора, вызванного изменением толщины МР эластомера. Под действием внешнего магнитного поля магнитные частицы стремятся выстроиться в цепочки и притянуться друг к другу, тем самым меняя распределение частиц в полимерной матрице и меняя ее длину в направлении приложенного магнитного поля. Это изменение конфигурации образца происходит медленно, поэтому измерения емкости проводились после процесса релаксации. На **Рис. 5** представлен график зависимости отношения  $C/C_0$  емкости конденсатора в магнитном поле  $C$  к емкости конденсатора без магнитного поля  $C_0$ . Измерения проводились сразу после включения магнитного поля и после релаксации в течение 2 минут. В результате было получено, что магнитное поле в 1,1 кЭ вызывает изменение емкости конденсатора в 2 раза.



**Рис. 5** График зависимости отношения  $C/C_0$  емкости конденсатора в магнитном поле  $C$  к емкости конденсатора без магнитного поля  $C_0$  [21].

В следующей работе I. Vica и др. [11] провели исследования анизотропного МР эластомера. Они также использовали плоский конденсатор, заполненный образцом, для определения модуля упругости МР эластомера. Образцы изготавливались в два этапа: на первом этапе магнитные частицы карбонильного железа смешивали с полимером, на втором этапе полученную смесь помещали между обкладками конденсатора, и происходила полимеризация под влиянием внешнего магнитного поля величиной 6,25 кЭ, приложенного перпендикулярно плоскости конденсатора. При внесении измерительного конденсатора в поперечное магнитное поле происходило увеличение емкости, которое объяснялось стремлением частиц выстраиваться в цепочки вдоль направления магнитного поля и их взаимным притяжением. Было показано, что это изменение емкости зависит от концентрации магнитных частиц в МР эластомере. Были проведены теоретические расчеты, позволяющие из изменения емкости конденсатора определить модуль упругости полимерной матрицы образца. К сожалению, сравнение полученных значений модуля упругости новым методом со значениями, полученными стандартными способами, не было приведено.

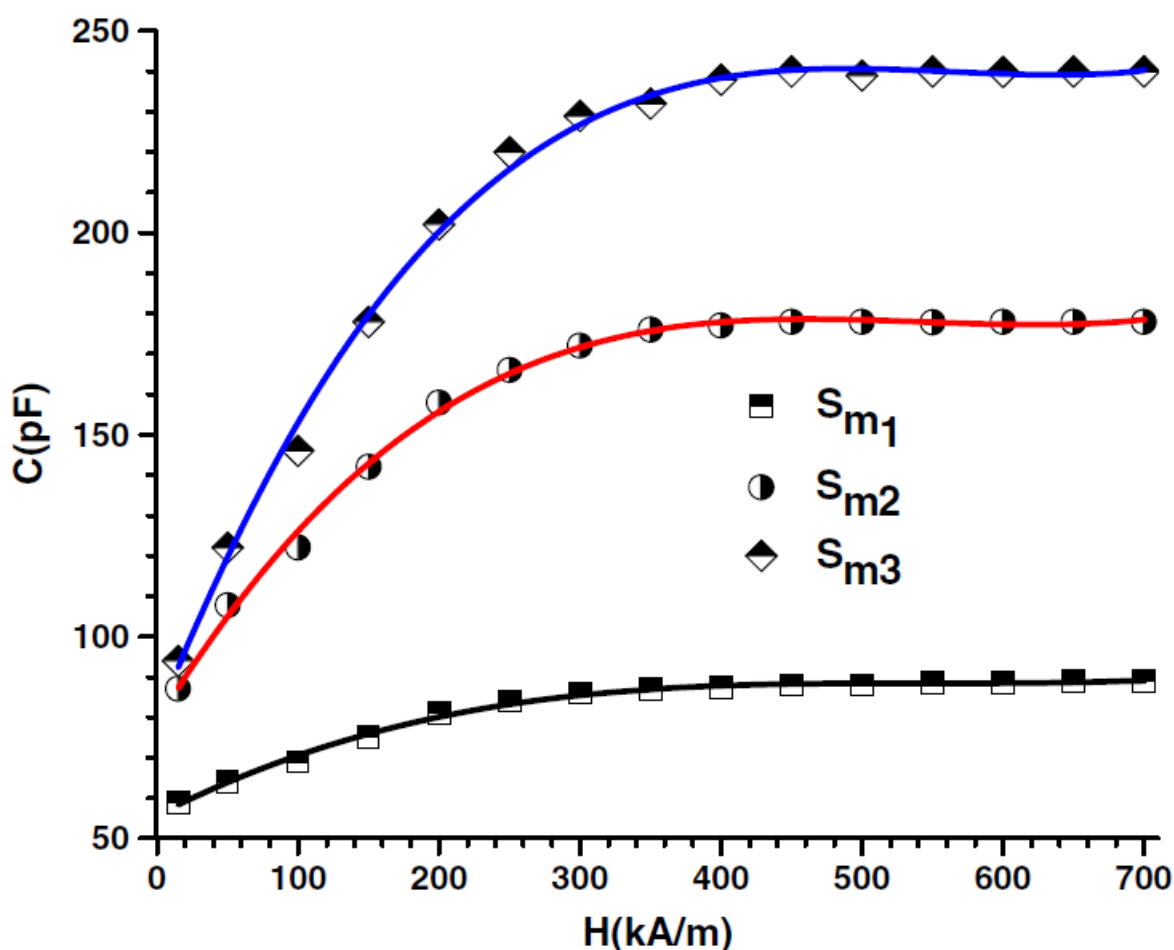
Далее I. Vica и др. провели еще одни исследования конденсатора, заполненного МР эластомером [22]. В этой работе авторы изготовили МР эластомеры с магнитными частицами из карбонильного железа с различными концентрациями (20%, 40% и 60%) изотропные и анизотропные. В качестве формы для изготовления образца использовались две стеклянные пластины, расстояние между которыми 1 мм. Между ними заливался полимер с магнитными частицами, далее прикладывалось внешнее магнитное поле величиной 6,25 кЭ перпендикулярно плоскости стекла. После этого происходила полимеризация в течение 24 часов. Из полученных образцов вырезались цилиндры диаметром 20 мм, толщиной 1 мм. К его торцам приклеивались медные пластины таких же диаметров, от которых отходят провода для измерения емкости (**Рис. 6**).



**Рис. 6** Фотографии МР эластомеров (а) и плоского конденсатора, заполненного образцом (б) [22].

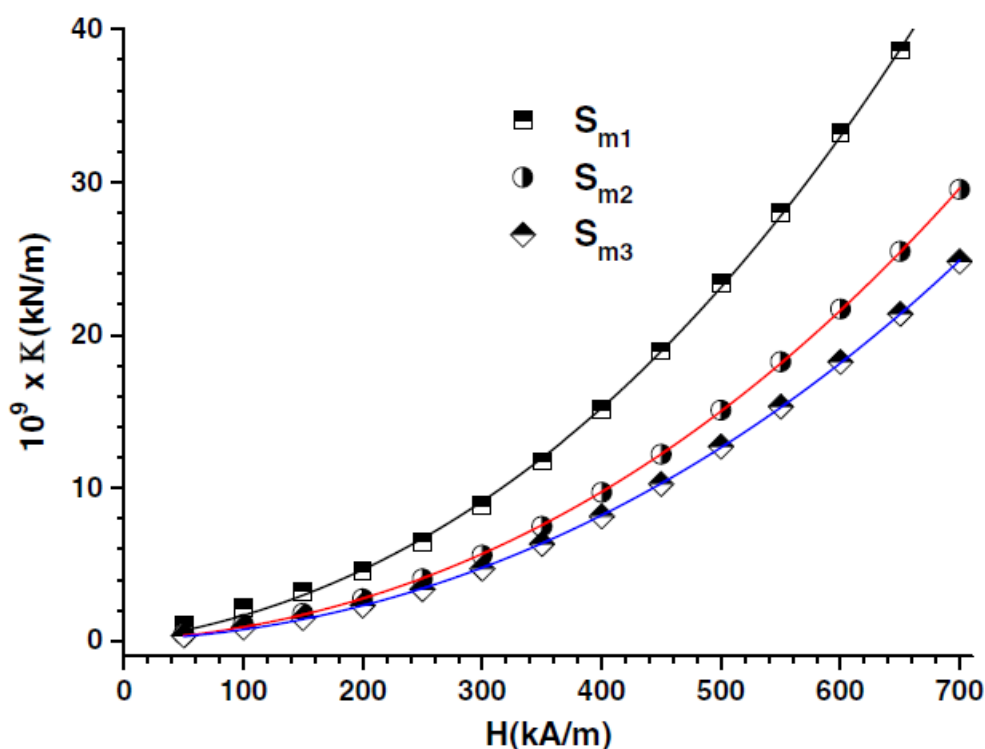
Все образцы были предварительно изучены на сканирующем электронном микроскопе. Снимки показали, что большие концентрации магнитных частиц под действием внешнего магнитного поля приводят к слипанию частиц. Это приводит к повреждению полимерной матрицы и ухудшению ее эластичных свойств. Если же изготавливать образцы без воздействия внешнего магнитного поля, то частицы распределяются равномерно в полимере и не происходит слипания частиц. Поэтому они исследовали только изотропные образцы.

Конденсатор с образцом помещался в магнитное поле величиной до 8,7 кЭ. На **Рис. 7** изображен график зависимости емкости конденсатора с МР эластомером от величины внешнего магнитного поля для образцов с различной концентрацией. Полученную зависимость можно разделить на две части. В первой части наблюдается рост емкости конденсатора в полях от 0 до 5 кЭ, во второй части значение емкости остается почти неизменным вплоть до значения магнитного поля в 8,7 кЭ.



**Рис. 7** График зависимости емкости конденсатора с МР эластомером (концентрации частиц 20, 40 и 60%) от величины внешнего магнитного поля [22].

Авторы статьи связали изменение емкости конденсатора с изменением толщины МР эластомера, расположенного между обкладок. Внешнее магнитное поле намагничивает магнитные частицы МР эластомера. Благодаря дипольному взаимодействию частицы начинают менять свое распределение внутри матрицы, тем самым изменяют размеры образца. Авторы статьи выразили коэффициент упругости МР эластомера через отношение емкости конденсатора без магнитного поля и емкости конденсатора в магнитном поле. В результате они представили графики зависимостей коэффициента упругости МР эластомера от величины внешнего магнитного поля для различных образцов **Рис. 8**.

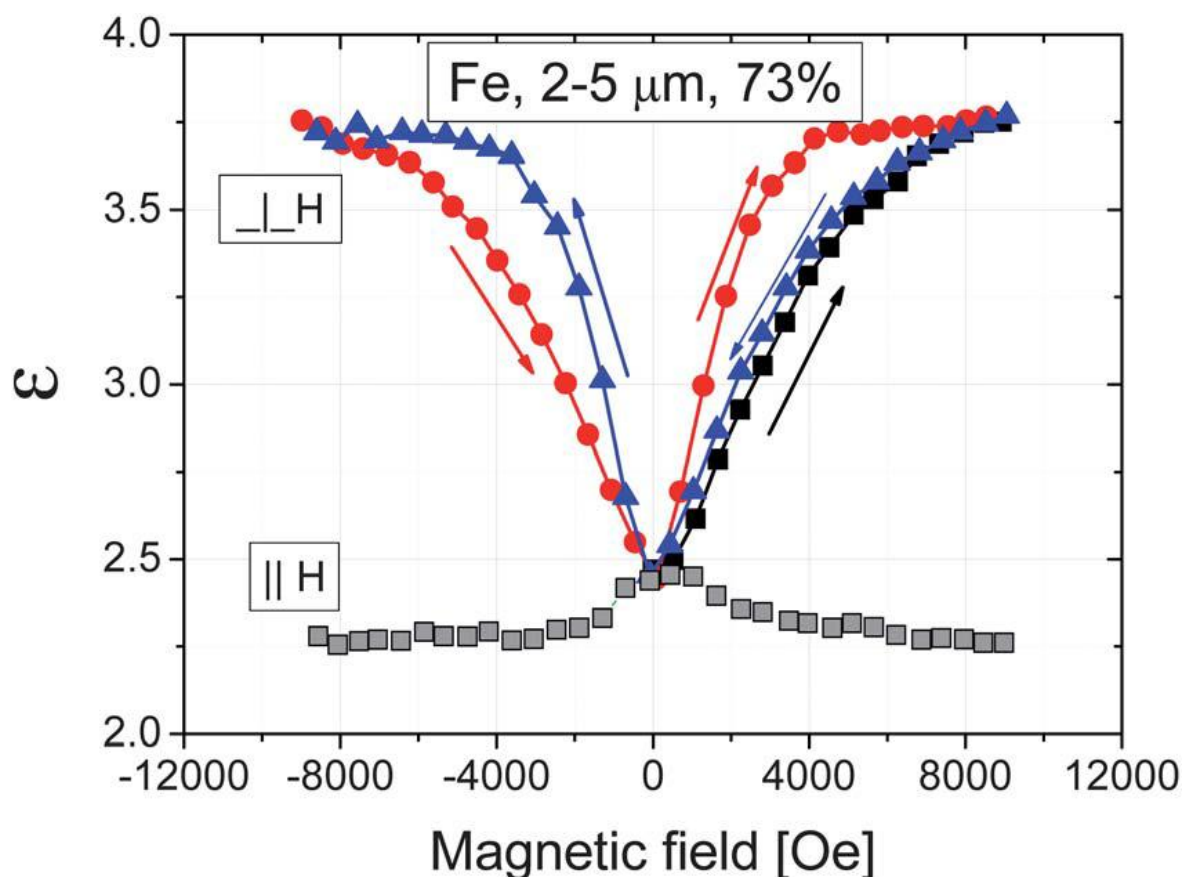


**Рис. 8** Графики зависимости коэффициента упругости МР эластомеров (концентрации частиц 20%, 40% и 60%) от величины внешнего магнитного поля [22].

#### 1.4. Диэлектрические свойства МР эластомеров

В своей работе А. Semisalova и др. [23] авторы изучили влияние внешнего магнитного поля на величину диэлектрической проницаемости МР эластомера. Исследовались изотропные образцы из силиконовой полимерной матрицы с различными магнитными частицами (Fe, NdFeB and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Образцы различались концентрацией магнитных частиц и их размерами. Для определения величины диэлектрической проницаемости образцов использовали плоский конденсатор. Обкладки конденсатора были жестко закреплены,

чтобы исключить изменение расстояния между ними. МР эластомеры изготавливались в виде пластин толщиной 3,5 мм. Пространство между обкладками конденсатора полностью заполнялось образцом. Из отношения емкости пустого конденсатора к емкости конденсатора с МР эластомером можно вычислить величину диэлектрической проницаемости образца. Конденсатор с образцом помещался в магнитное поле величиной до 10 кЭ. На **Рис. 9** представлен график зависимости величины диэлектрической проницаемости МР эластомера от величины приложенного магнитного поля. Было обнаружено, что внешнее магнитное поле оказывает влияние на емкость конденсатора с образцом. Это влияние не связано с изменением расстояния между обкладок конденсатора как в работах I. Vica [11], [21], [22]. Изменение емкости конденсатора вызвано изменением диэлектрической проницаемости МР эластомера. Было обнаружено, что при перпендикулярной ориентации магнитного поля и плоскости конденсатора происходит увеличение диэлектрической проницаемости. В случае параллельной ориентации наблюдается незначительное уменьшение. Максимальные значения относительного увеличения диэлектрической проницаемости образца с магнитными частицами Fe составило 80%, а с частицами NdFeB – 150%.



**Рис. 9** График зависимости величины диэлектрической проницаемости МР эластомеров от величины приложенного магнитного поля. Перпендикулярная и параллельная ориентации магнитного поля и плоскости конденсатора [23].

## Глава 2. Исследуемые образцы и их описание

Магнито реологические эластомеры состоят из упругой матрицы, в которой распределены магнитные частицы. Меняя концентрацию частиц, параметры частиц и матрицы, можно получить магнито реологические эластомеры с различными свойствами.

Были изучены МРЭ четырех типов.

Образцы *первого* типа – МРЭ на основе силиконового полимера с магнитными частицами карбонильного железа.

Для них исследовалась зависимость диэлектрической проницаемости образцов от магнитного поля. Эти образцы отличались размерами магнитных частиц – крупные (5-10 мкм) и мелкие (2-5 мкм), и массовой долей магнитных частиц в образце – 40%, 65% и 77% масс. На фотографии представлен образец, подготовленный к измерению.



Образцы *второго* типа – МРЭ на основе FeNdB. Определялись намагниченность насыщения образцов, коэрцитивная сила, исследовалась диэлектрическая проницаемость в магнитных полях.

1. Образцы с жесткой матрицей.  $C_{общее} \sim 83-84\%$

- а) Чистый FeNdB – серебристый образец;
- б) FeNdB разбавленный немагнитным наполнителем  $\alpha - Fe_2O_3$ .

FeNdB – 65%,  $\alpha - Fe_2O_3$  - 35%. Образец красного цвета.



2. Образцы в эластичной матрице. Составы те же:

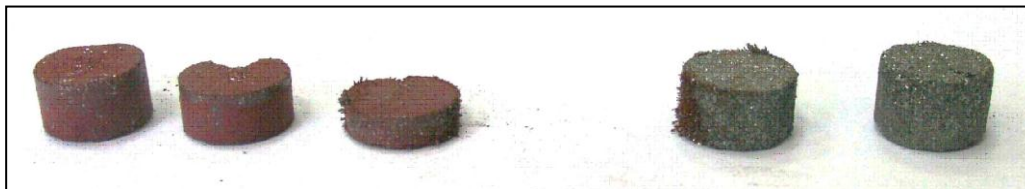
- а) Чистый FeNdB – серебристый образец;
- б) FeNdB разбавленный немагнитным наполнителем  $\alpha - Fe_2O_3$ .

FeNdB – 65%,  $\alpha - Fe_2O_3$  - 35%. Образец красного цвета.



3. Образцы спрессованные в таблетки со связкой (5-6%).  $C_{общее} \sim 94-95\%$

- а) Чистый FeNdВ – две серебристые таблетки разной толщины; FeNdВ разбавленный немагнитным наполнителем  $\alpha - Fe_2O_3$ . FeNdВ – 65%,  $\alpha - Fe_2O_3$  - 35%. Три красные таблетки разной толщины.



Образцы *третьего* типа были изготовлены из одинакового полимера и различных магнитных частиц. Для этих МРЭ исследовалась зависимость диэлектрической проницаемости образцов от магнитного поля без внешнего напряжения и под напряжением (сжатие образца на 30%). Всего четыре образца:

1. Силиконовый полимер без магнитных частиц
2. Силиконовый полимер с частицами Ni, массовая концентрация 80%, размер частиц 3-5 мкм
3. Силиконовый полимер с крупными частицам Fe (40-60 мкм) с массовой концентрацией 82%
4. Силиконовый полимер с частицами Fe-Ni с массовой концентрацией 79%, размер частиц 3-5 мкм

Образцы *четвертого* типа отличались типом магнитных частиц и их массовой концентрацией:

1. Четыре МРЭ с частицами Fe с массовыми концентрациями 55%, 61%, 72% и 78%.
2. Три МРЭ с частицами FeNdВ с массовыми концентрациями 60%, 69% и 75%.

Для этих образцов определялись намагниченность насыщения, коэрцитивная сила и исследовалась зависимость диэлектрической проницаемости от магнитного поля без внешнего напряжения.

Все образцы предоставлены Г.В. Степановы, ГНИИХТЭОС (Москва).



## Глава 3. Методика исследования

### 3.1. Методика измерения диэлектрической проницаемости образцов

Диэлектрическая проницаемость образца определялась из емкости плоского конденсатора, заполненного МРЭ. Емкость конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \text{ где}$$

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками конденсатора,

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,

$S$  – площадь обкладок конденсатора,

$d$  – расстояние между обкладками.

Таким образом, если измерить емкость пустого конденсатора  $C_0$ , емкость конденсатора с образцом  $C$ , то из их отношения можно вычислить величину диэлектрической проницаемости образца

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}.$$

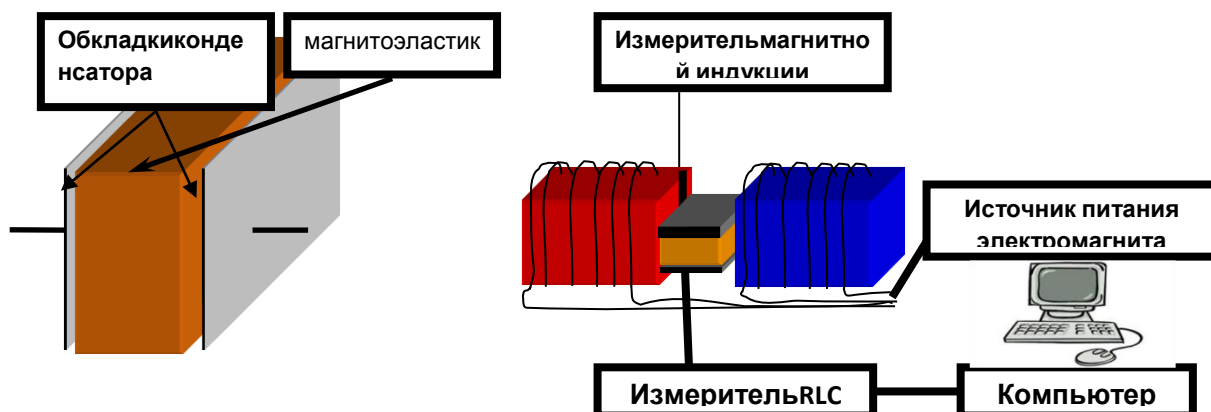
Емкость конденсатора измерялась с помощью измерителя RLC AM-3016 фирмы Актаком на частотах от 1 до 200 кГц. Также проводилось измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

В измерениях использовались образцы размером 15x8x2 мм, обернутые в полиэтилен, чтобы исключить проводимость образца и его высыхание. Для создания внешнего напряжения обкладки конденсатора с МРЭ сжимались таким образом, чтобы расстояние между обкладками уменьшалось на 30%.

Конденсатор с образцом помещался между полюсами электромагнита. В магните создавалось постоянное магнитное поле величиной до 5,5 кЭ.

Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно или параллельно плоскости обкладок конденсатора. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Ниже представлена блок-схема измерительной установки.



### 3.2. Методика измерения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения

Коэрцитивная сила и намагниченность насыщения образца определялись из петель гистерезиса. Петли снимались на вибрационном магнетометре фирмы *LakeShore*. Все измерения проводились при комнатной температуре в полях до 16 кЭ. Единица измерения намагниченности магнетометра  $\text{emu}$ ,  $1 \text{ emu} = 1 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$

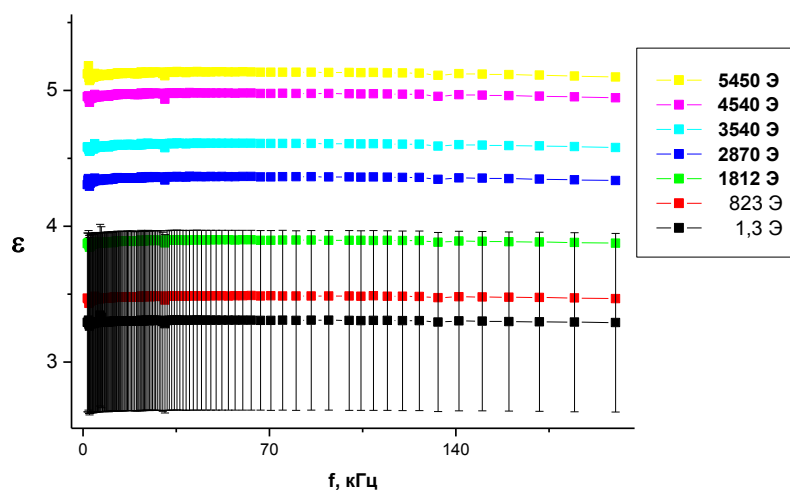
### 3.3. Методика изучения влияния внешнего электрического поля на магнитные свойства МРЭ

Для изучения влияния внешнего электрического поля на магнитный момент был изготовлен плоский конденсатор со стеклянными обкладками, покрытыми медной фольгой. Между обкладками конденсатора помещали изучаемый МРЭ. Измерительный конденсатор с образцом закреплялся на штоке вибрационного магнетометра. Прикладывая постоянное напряжение к обкладкам конденсатора, создавалось электрическое поле. Величина прикладываемого напряжения 300В, расстояние между обкладками конденсатора 1 мм.

## Глава 4. Описание полученных результатов и их обсуждение

Для всех образцов в первую очередь снимались частотные зависимости – зависимость диэлектрической проницаемости МРЭ в различных магнитных полях.

Измерения проводились на частотах от 1 до 200 кГц. Эти зависимости для случая перпендикулярной ориентации измерительного конденсатора с МРЭ и магнитного поля представлены на **Рис. 10**.



**Рис. 10.** График зависимости диэлектрической проницаемости образца от частоты в различных магнитных полях. Мелкие частицы, 77% масс., перпендикулярная ориентация, 1 тип МРЭ.

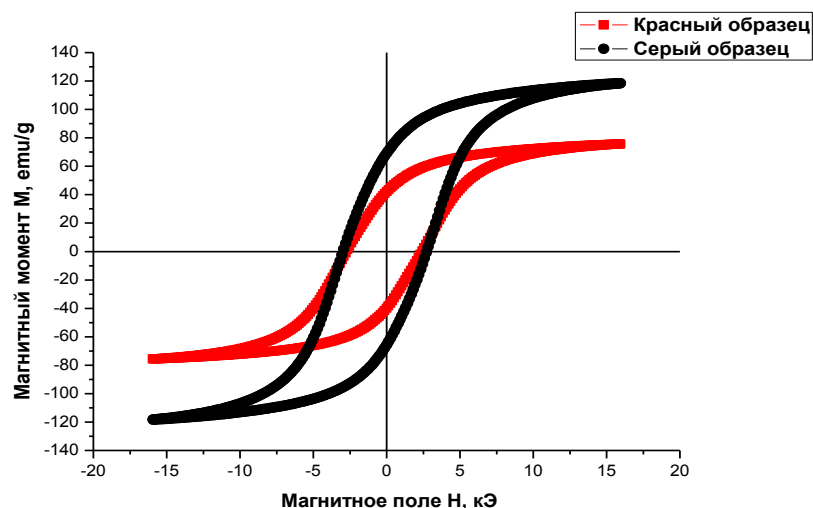
На графике нанесена погрешность величины диэлектрической проницаемости для случая минимального поля. На всех последующих графиках погрешность не указывается для того, чтобы не загромождать их. Эксперимент имеет плохую повторяемость. При измерении каждого нового образца клеммы измерителя RLC крепились к обкладкам конденсатора по-новому. В связи с этим, даже на пустом конденсаторе для различных креплений клемм получались различные значения емкости. Поэтому нанесенная погрешность столь велика. Однако в процессе одного измерения, когда клеммы не переставляются, точность измерения велика и уже в этом случае можно говорить о наблюдаемых тенденциях.

Можно отметить, что величина диэлектрической проницаемости не зависит от частоты. Поэтому все последующие измерения проводились на одной частоте – 100 кГц. Для каждого нового образца и новой ориентации проводились измерения по всем частотам – все измерения показали независимость диэлектрической проницаемости от частоты.

Далее снимались полевые зависимости – образец намагничивался в поле от 0 до 5,5 кЭ, затем поле уменьшалось до 0 Э.

#### 4.1. Результаты исследования образцов второго типа из FeNdB с матрицами различной жесткости

При помощи вибрационного магнитометра были сняты петли гистерезиса для всех образцов. Измерения проводились в магнитном поле до 16 кЭ. На **Рис. 11** приведена типичная петля гистерезиса для образца.



**Рис. 11.** График зависимости магнитного момента образцов  $M$  на основе эластичной матрицы от величины магнитного поля  $H$ , МРЭ второго типа.

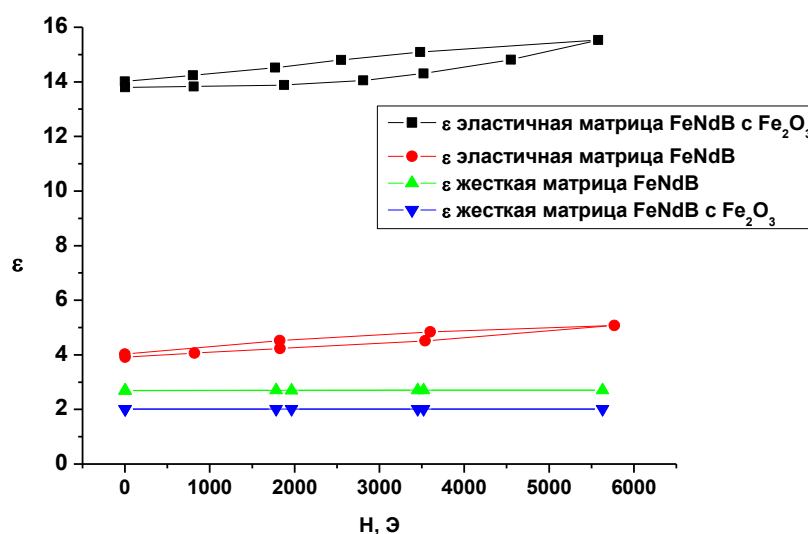
В **Табл. 1** приведены величины коэрцитивной силы и намагниченности насыщения для всех образцов второго типа.

Образец	Коэрцитивная сила $H_c$ , Э	Намагниченность насыщения $M$ , едм/г
---------	-----------------------------	---------------------------------------

Эластичная матрица	FeNdB (54%) + Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (30%)	2570	75
	FeNdB (83%)	2850	120
Жесткая матрица	FeNdB (54%) + Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (30%)	2970	94
	FeNdB (83%)	2860	140
Жесткая матрица со связкой	FeNdB (94%)	2300 – 2600	140 - 150
	FeNdB (61%) + Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (33%)	2900 - 3000	100 - 105

**Табл. 1** Коэрцитивная сила и намагниченность насыщения образцов на основе FeNdB и FeNdB+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, МРЭ второго типа.

Для МРЭ второго типа с эластичной матрицей и жесткой матрицей так же было проведено исследование изменения емкости конденсатора, заполненного образцом при изменении внешнего магнитного поля. Измерения проводились при перпендикулярной ориентации плоскости конденсатора относительно внешнего магнитного поля. На **Рис. 12** представлены графики зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ для образцов с различной жесткостью матриц. В **Табл. 2** приведены численные значения изменения диэлектрической проницаемости МРЭ при внесении образца в магнитное поле с матрицами различной жесткости. Из нее видно, что у МРЭ с эластичной матрицей изменение величины диэлектрической проницаемости больше (13% и 30%), чем для МРЭ с жесткой матрицей (0,1% и 0,7% соответственно).



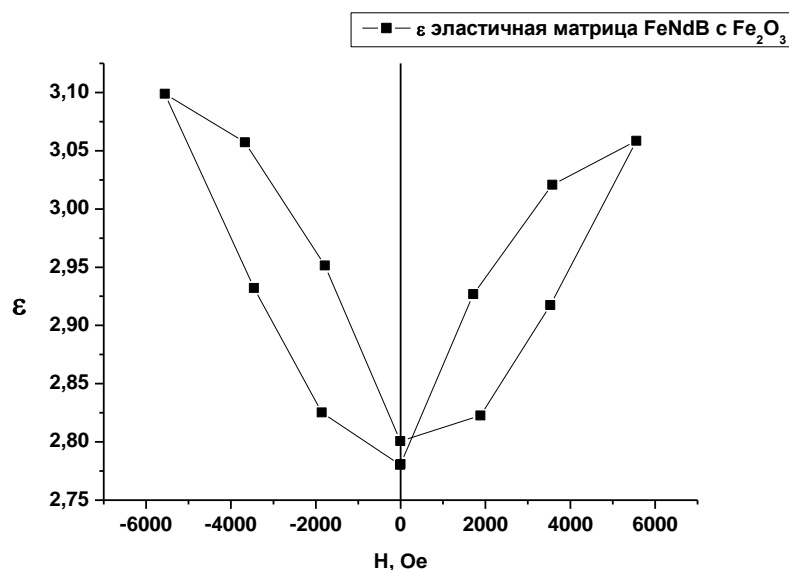
**Рис. 12** Графики зависимостей диэлектрической проницаемости МРЭ от величины

внешнего магнитного поля. Сравнение МРЭ с матрицами различной жесткости.

МРЭ	Абсолютное изменение $\epsilon$	Относительное изменение $\epsilon$ , %
Эластичная матрица FeNdB с Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,7	13
Жесткая матрица FeNdB с Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0023	0,1
Эластичная матрица FeNdB	1,2	30
Жесткая матрица FeNdB	0,0186	0,7

**Табл. 2** Величины абсолютного и относительного изменения диэлектрической проницаемости МРЭ с матрицами различной жесткости при внесении образца в магнитное поле.

На **Рис. 13** представлен график зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ от величины внешнего магнитного поля при циклическом намагничивании и размагничивании образца.

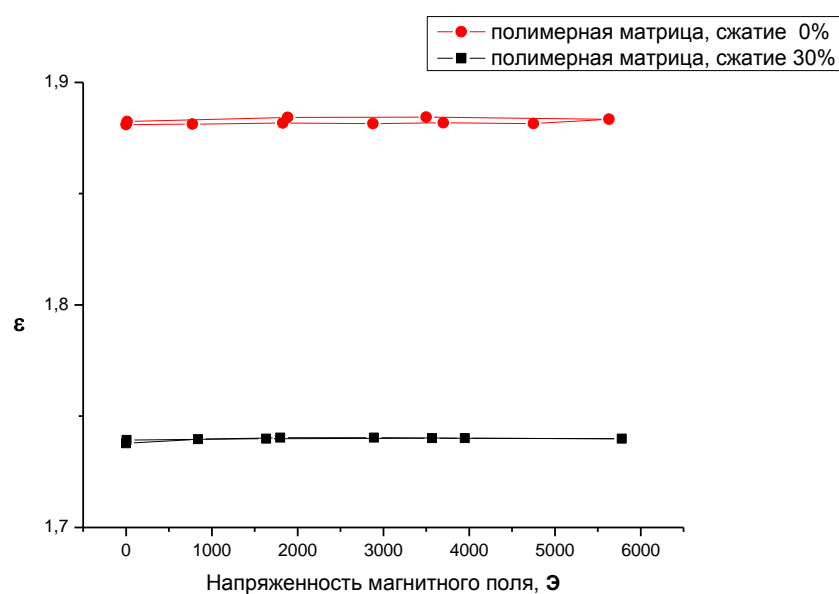


**Рис. 13** График зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ от величины магнитного поля при циклическом намагничивании и размагничивании образца.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что внешнее магнитное поле изменяет величину диэлектрической проницаемости МРЭ. Это связано с взаимодействием магнитного поля с магнитными частицами образца. Под действием магнитного поля изменяется взаимное расположение частиц в образце, за счет чего меняется и диэлектрическая проницаемость. Величина смещения частиц зависит от жесткости полимерной матрицы. Для МРЭ с жесткой матрицей наблюдается меньшее влияние магнитного поля на изменение диэлектрической проницаемости, чем для МРЭ с эластичной матрицей. Действительно, в эластичной матрице магнитные частицы могут сместиться на большие расстояния, чем в твердой матрице.

#### 4.2. Результаты исследования МРЭ третьего типа из одного полимера с различными магнитными частицами

Для образцов МРЭ третьего типа проводилось исследование зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ от величины внешнего магнитного поля в недеформированном состоянии и под напряжением, вызванном сжатием образца на 30%. Сначала исследовался силиконовый полимер без магнитных частиц – матрица. На **Рис. 14** представлены графики зависимости диэлектрической проницаемости силиконового полимера без магнитных частиц от величины внешнего магнитного поля для случаев сжатия на 0% и 30%.

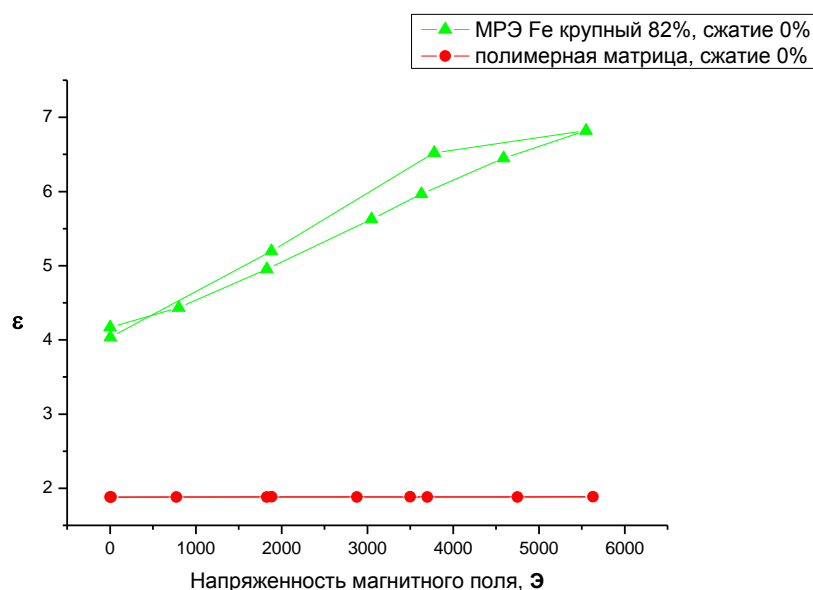


**Рис. 14** График зависимости диэлектрической проницаемости полимера без магнитных частиц от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора.

Сжатие 0% и 30%.

Из полученных результатов можно сделать вывод о независимости величины диэлектрической проницаемости полимера от внешнего магнитного поля. Различие значений диэлектрической проницаемости при сжатии образца на 0% и 30% связано с погрешностью измерительной установки.

Далее были проведены измерения зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ от внешнего магнитного поля при сжатии образца на 0% и 30%. На **Рис. 15** приведен график одной из таких зависимостей для МРЭ с крупными магнитными частицами Fe с массовой концентрацией 82%. Для сравнения на график нанесена та же самая зависимость для чистой полимерной матрицы.

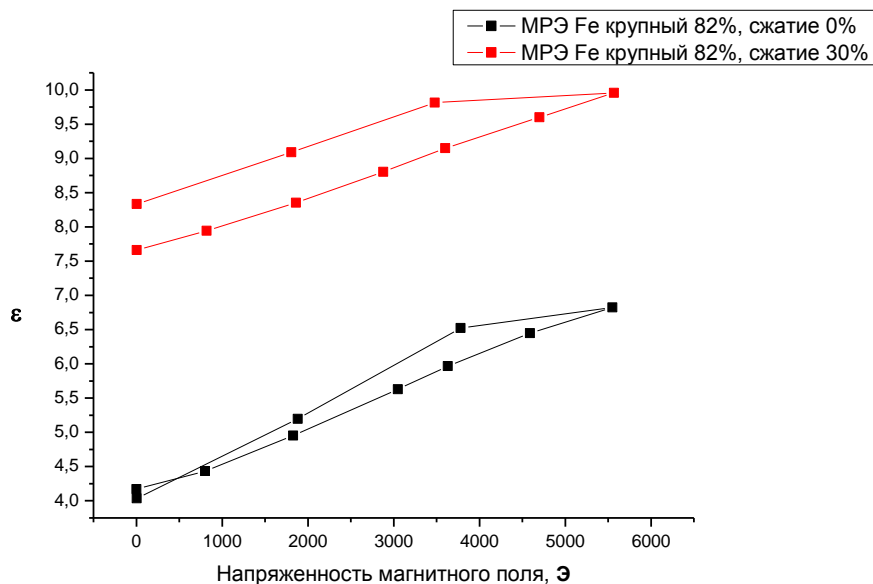


**Рис. 15** Графики зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ из Fe 82% и полимера без магнитных частиц от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора. Сжатие 0%.

Наблюдаемое влияние внешнего магнитного поля на величину диэлектрической проницаемости связано с наличием в образцах магнитных частиц, способных взаимодействовать с магнитным полем.



На **Рис. 16** представлен график зависимости величины диэлектрической проницаемости МРЭ с крупными магнитными частицами Fe с массовой концентрацией 82% от величины магнитного поля для сжатия образца на 0% и 30%.



**Рис. 16** Графики зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ из Fe 82% от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора. Сжатие 0% и 30%

В **Табл. 3** для всех МРЭ третьего типа представлены значения диэлектрической проницаемости при магнитном поле равном 0 Э и 5,5 кЭ, относительное и абсолютное изменения диэлектрической проницаемости при внесении МРЭ в магнитное поле.

Образец	Сжатие 0%		Сжатие 30%		Сжатие 0%		Сжатие 30%	
	Поле $H=0$ Э; $\epsilon$	Поле $H=5,5$ кЭ; $\epsilon$	Поле $H=0$ Э; $\epsilon$	Поле $H=5,5$ кЭ; $\epsilon$	$\Delta(\epsilon)$ , %	$\Delta(\epsilon)$ , абс. значение	$\Delta(\epsilon)$ , %	$\Delta(\epsilon)$ , абс. значение
Полимер	1,881	1,883	1,738	1,739	0,13	0,0024	0,12	0,0021
МРЭ Ni	5,19	5,62	10,29	10,74	8,4	0,4	4,38	0,451

80%								
MPЭ Fe крупный 82%	4,2	6,8	7,6	9,9	64	2,6	30	2,3
MPЭ Fe- Ni 79%	4	15	4	14	285	11	238	10

**Табл. 3** Таблица значений диэлектрической проницаемости MPЭ (третий тип) в конденсаторе в максимальном магнитном поле и без него. Приведены относительные и абсолютные изменения величины диэлектрической проницаемости MPЭ. Сжатие образца 0% и 30%.

Из полученных значений следует, что при воздействии внешними напряжениями на MPЭ, изменение величины диэлектрической проницаемости при внесении в магнитное поле уменьшается. Это связано с тем, что внешнее воздействие создает дополнительное упругое напряжение, препятствующее смещению магнитной частицы. Стоит отдельно отметить величину роста (285%) диэлектрической проницаемости при внесении в магнитное поле образце MPЭ из Fe-Ni с массовой концентрацией частиц 79%. Такое сильное отличие от остальных образцов можно связать с высокой эластичностью этого образца, что позволило магнитным частицам в MPЭ свободнее смещаться под действием магнитного поля.

#### **4.4. Результаты исследования MPЭ первого типа из Fe с различными концентрациями**

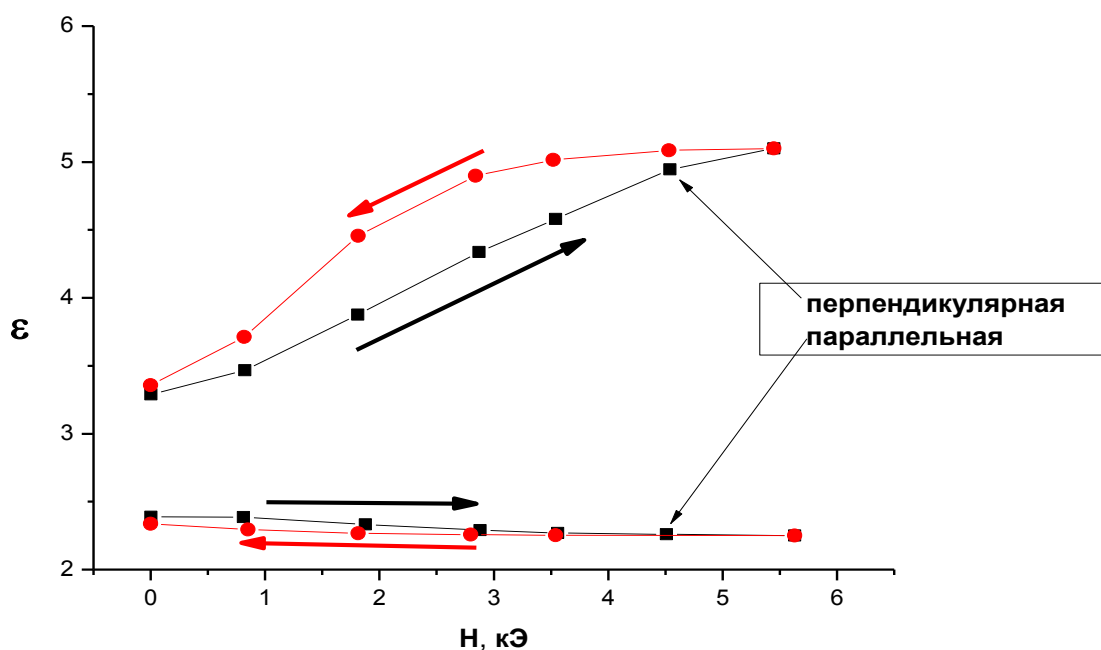
На **Рис. 17** приведен график зависимости диэлектрической проницаемости от величины поля для случая перпендикулярной и параллельной ориентации внешнего магнитного поля и плоскости конденсатора для MPЭ первого типа на основе магнитных частиц из Fe.

Для случая перпендикулярной ориентации наблюдается увеличение величины диэлектрической проницаемости, порядок изменения - десятки процентов. Так же наблюдается гистерезисная зависимость при перемагничивании образца. Под действием магнитного поля магнитные частицы в MPЭ смещаются на небольшие расстояния, стремясь выстроиться в цепочки вдоль направления приложенного магнитного поля. Это

приводит к тому, что по направлению между обкладок конденсатора расстояние между отдельными частицами становится меньше, благодаря чему увеличивается емкость измерительного конденсатора, т.е. увеличивается диэлектрическая проницаемость образца.

При параллельной ориентации наблюдается противоположный эффект. Величина проницаемости уменьшается, но уже незначительно – порядка нескольких процентов. Говорить о гистерезисной зависимости нельзя, поскольку расхождение значений лежит в пределах погрешности. В этом случае магнитные частицы стремятся выстроиться в цепочки вдоль обкладок конденсатора, а это приводит к тому, что по направлению между обкладок конденсатора расстояние между отдельными частицами становится больше, благодаря чему уменьшается емкость измерительного конденсатора, т.е. уменьшается диэлектрическая проницаемость образца.

Все численные результаты приведены в Табл. 4.

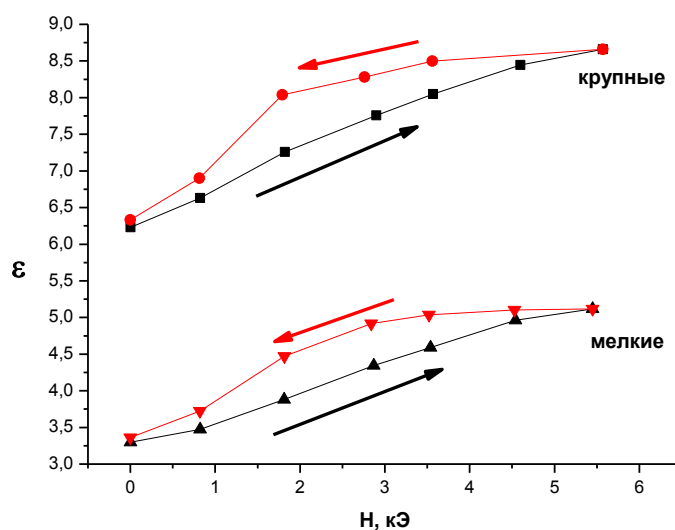


**Рис. 17** График зависимости диэлектрической проницаемости образца от магнитного поля для разных ориентаций конденсатора. Мелкие частицы 77% масс., МРЭ первого типа.

Образцы	% масс.	$\Delta\epsilon/\epsilon*100\%$	$\Delta\epsilon$	Образцы	% масс.	$\Delta\epsilon/\epsilon*100\%$	$\Delta\epsilon$
Мелкие	40	15	0,4	Мелкие	40	-3	-0,08
	65	41	1,5		65	-4	-0,11
	77	55	1,8		77	-6	-0,14
Крупные	77	38	2,4	Крупные	77	-12	-0,5
перпендикулярная				параллельная			

**Табл. 4.** Абсолютные и относительные изменения диэлектрической проницаемости различных образцов МРЭ первого типа для перпендикулярной и параллельной ориентаций.

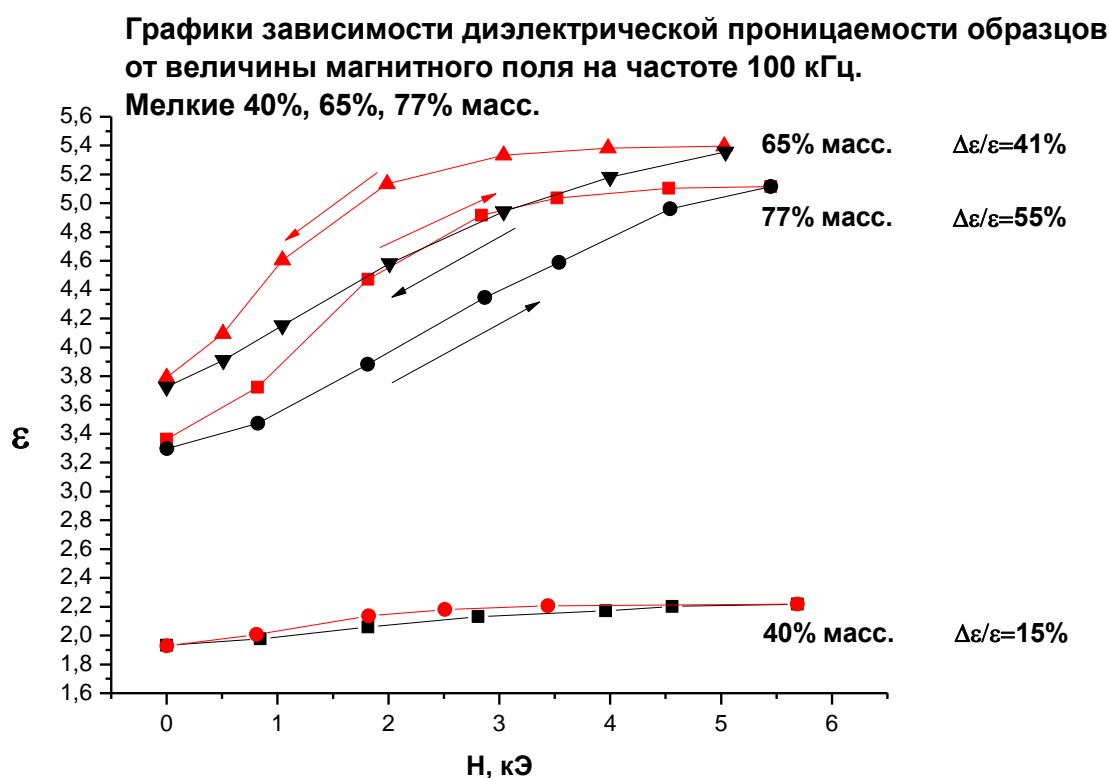
На **Рис. 18** представлен график зависимостей диэлектрической проницаемости образцов с одинаковой массовой концентрацией магнитных частиц, но разным размером. Отмечено, что величина проницаемости образца из крупных частиц почти вдвое больше, чем для образца с мелкими частицами. При этом у образца с мелкими частицами относительное изменение  $\epsilon$  больше, чем у образца с крупными частицами.



**Рис. 18.** Графики зависимости диэлектрической проницаемости образцов от величины

магнитного поля. Крупные и мелкие частицы 77% масс.

Для сравнения эффекта для образцов с частицами одинаковых размеров, но разных концентраций, приведен график  $\epsilon(H)$  на Рис. 19. Из него видно, что величина диэлектрической проницаемости зависит немонотонно от концентрации частиц в образце. Однако относительное изменение величины проницаемости монотонно меняется с изменением концентрации. Для образца с концентрацией 40% масс. величина эффекта мала и почти не заметна.

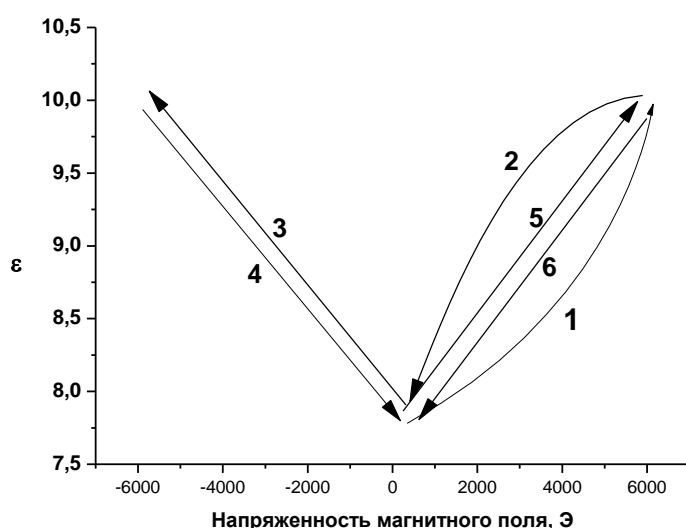


**Рис. 19.** Графики зависимости  $\epsilon$  от величины магнитного поля для образцов с разной концентрацией частиц.

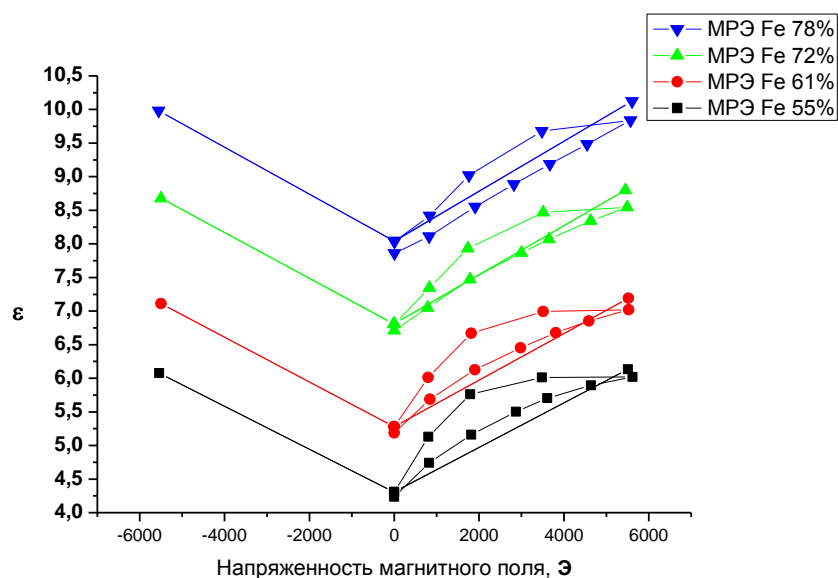
#### 4.5. Результаты исследования МРЭ четвертого типа из Fe и FeNdB с различными концентрациями

Для четвертого типа МРЭ на основе Fe (первая серия) и FeNdB (вторая серия) полевые зависимости снимались в два этапа. На первом этапе образец намагничивался в

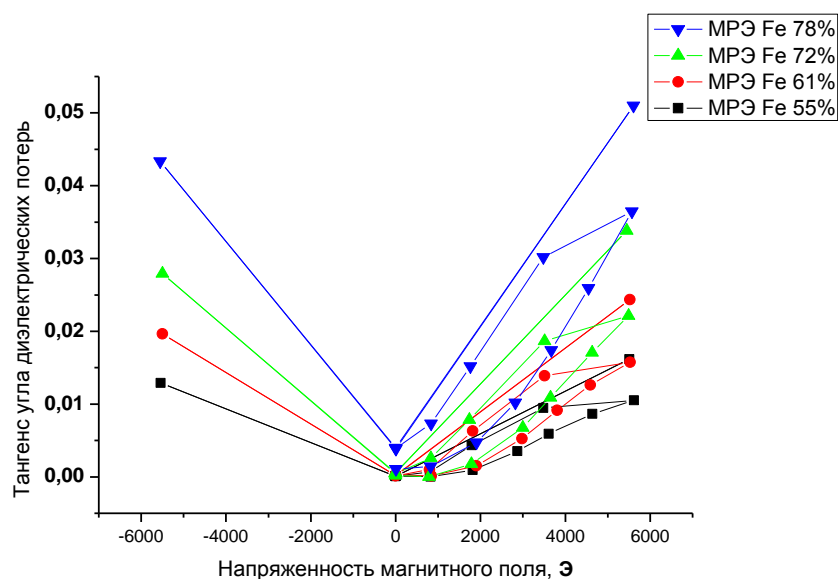
поле от 0 до 5,5 кЭ, затем поле уменьшалось до 0 Э. На этом этапе величина магнитного поля менялась с маленьким шагом, суммарно одиннадцать точек. На втором этапе поле последовательно выставлялось в минимальное значение, в нулевое значение, в максимальное и опять в нулевое (соответственно -5,5; 0; 5,5; 0 кЭ). Сначала будут представлены результаты для МРЭ на основе Fe. На **Рис.20** схематически отображен характер изменения величины магнитного поля и соответствующего изменения величины диэлектрической проницаемости образцов. На **Рис. 21** приведены графики зависимости диэлектрической проницаемости образцов от величины внешнего магнитного поля для МРЭ второй серии с частицами Fe с массовыми концентрациями 55, 61, 72 и 78%. На **Рис. 22** приведены графики зависимости тангенса угла диэлектрических потерь образцов от величины внешнего магнитного поля для МРЭ второй серии с частицами Fe с массовыми концентрациями 55, 61, 72 и 78%.



**Рис.20** Схематическое отображение характера изменения величины магнитного поля и соответствующего изменения величины диэлектрической проницаемости образцов. Цифрами указаны последовательные этапы процесса измерения.



**Рис. 21** График зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ ( первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора.



**Рис. 22** Графики зависимости тангенса угла диэлектрических потерь МРЭ ( первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) в конденсаторе от величины внешнего магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора.

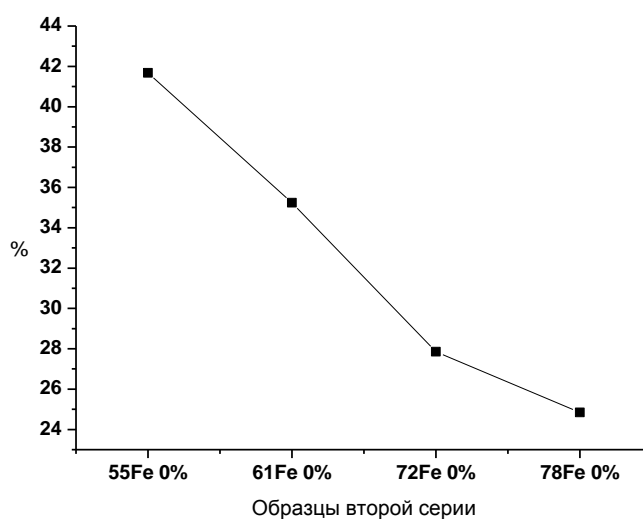
Для случая перпендикулярной ориентации наблюдается увеличение величины диэлектрической проницаемости при увеличении величины внешнего магнитного поля,

порядок изменения - десятки процентов. Так же наблюдается гистерезисная зависимость при перемагничивании образца.

В **Табл. 5** приведены усредненные значения диэлектрической проницаемости образцов без внешнего магнитного поля и в максимальном поле, величина относительного (в процентах) и абсолютного изменения диэлектрической проницаемости, связанного с включением магнитного поля. Эти же значения отображены графически на **Рис. 23** и **Рис. 24** соответственно.

МРЭ	Поле $H=0$ $\varepsilon$	Поле $H=5,5$ $k\varepsilon$	$\Delta(\varepsilon)$ , %	$\Delta(\varepsilon)$ , абс. значение
Fe 55%	4,3	6,1	42	1,79
Fe 61%	5,2	7,1	35	1,85
Fe 72%	6,8	8,6	28	1,89
Fe 78%	8,0	9,9	25	1,98

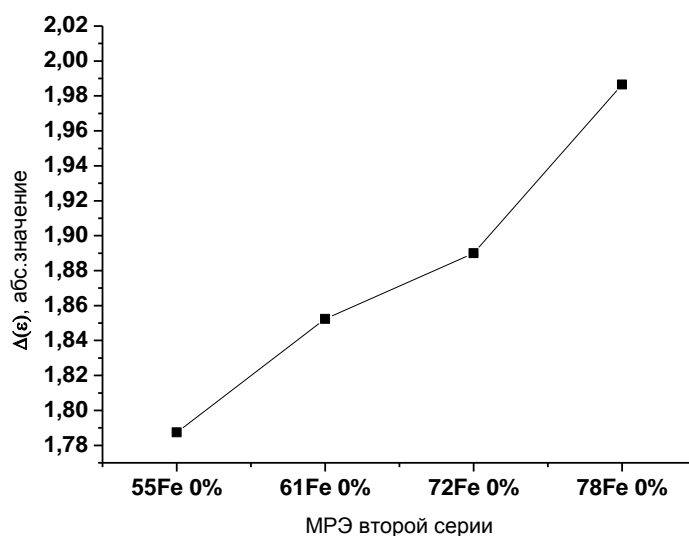
**Табл. 5** Таблица значений диэлектрической проницаемости МРЭ (Fe 55, 61, 72 и 78%) в конденсаторе в максимальном магнитном поле и без него. Приведены относительные и абсолютные изменения величины диэлектрической проницаемости МРЭ.



**Рис. 23** График значений относительного изменения величины диэлектрической проницаемости различных МРЭ (первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) при включении



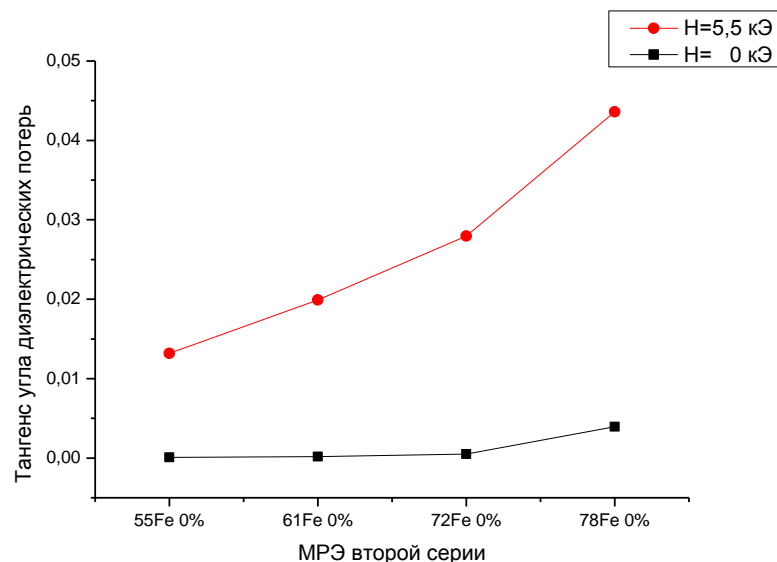
внешнего магнитного поля.



**Рис. 24** График значений абсолютного изменения величины диэлектрической проницаемости различных МРЭ (первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) при включении внешнего магнитного поля.

Из полученных данных следует, что с ростом концентрации магнитных частиц железа в МРЭ величина абсолютного изменения диэлектрической проницаемости при включении внешнего магнитного поля увеличивается. Относительное же изменение диэлектрической проницаемости падает.

На **Рис. 25** изображены зависимости величины тангенса угла диэлектрических потерь для МРЭ из Fe с концентрациями 55, 61, 72 и 78% без внешнего поля (0 Э) и в максимальном поле (5,5 кЭ). При внесении образцов во внешнее магнитное поле величина потерь возрастает. С ростом концентрации магнитных частиц наблюдается рост значения тангенса угла диэлектрических потерь. Все значения представлены в **Табл. 6**.



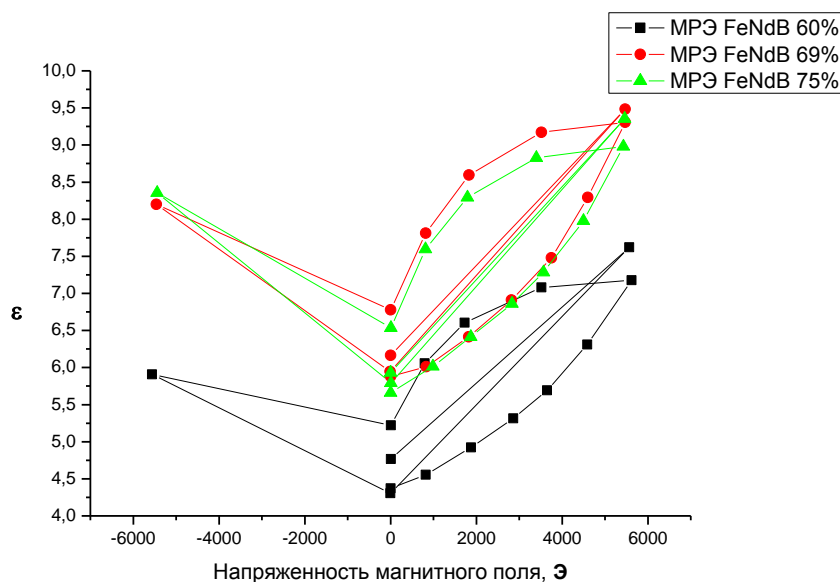
**Рис. 25** Графики зависимости тангенса угла диэлектрических потерь МРЭ (первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) в конденсаторе без магнитного поля ( $H=0$  кЭ) и в максимальном поле ( $H=5,5$  кЭ).

МРЭ	Поле $H=0$ Э	Поле $H=5,5$ кЭ	$(D_{max}-D_{min})/D_{min}$
	$D_{min}$	$D_{max}$	
Fe 55%	9,8E-05	0,013	130
Fe 61%	1,7E-04	0,019	115
Fe 72%	5,0E-04	0,028	55
Fe 78%	0,0039	0,044	10

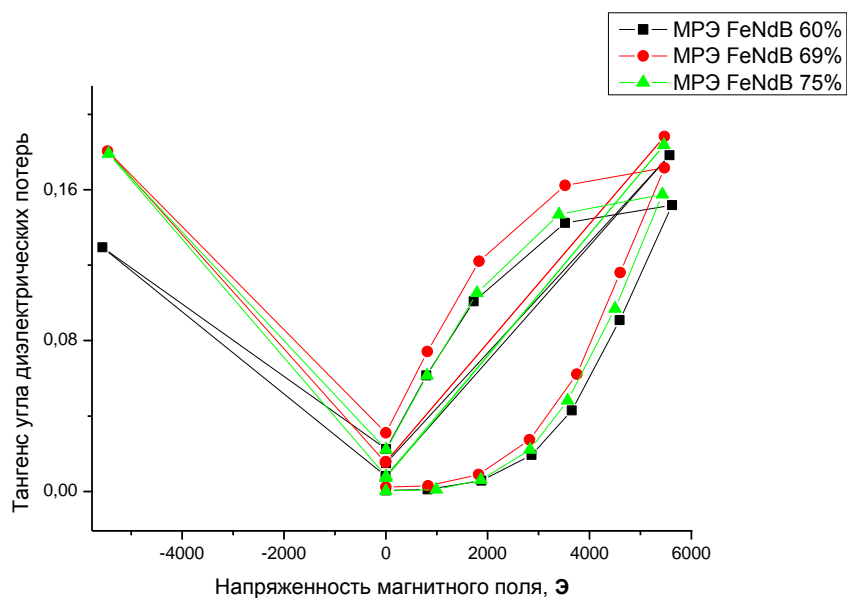
**Табл. 6** Таблица значений тангенса угла диэлектрических потерь  $D$  МРЭ (первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) в конденсаторе в максимальном магнитном поле ( $D_{max}$ ) и без него ( $D_{min}$ ). Приведены относительные изменения величины тангенса угла диэлектрических потерь  $D$  МРЭ.

Теперь представим результаты для МРЭ второй серии из FeNdB. На **Рис. 26** приведены графики зависимости диэлектрической проницаемости образцов от величины внешнего магнитного поля для МРЭ второй серии с частицами FeNdB с массовыми

концентрациями 60, 69 и 75%. На **Рис. 27** приведены графики зависимости тангенса угла диэлектрических потерь образцов от величины внешнего магнитного поля для МРЭ второй серии с частицами FeNdB с массовыми концентрациями 60, 69 и 75%.



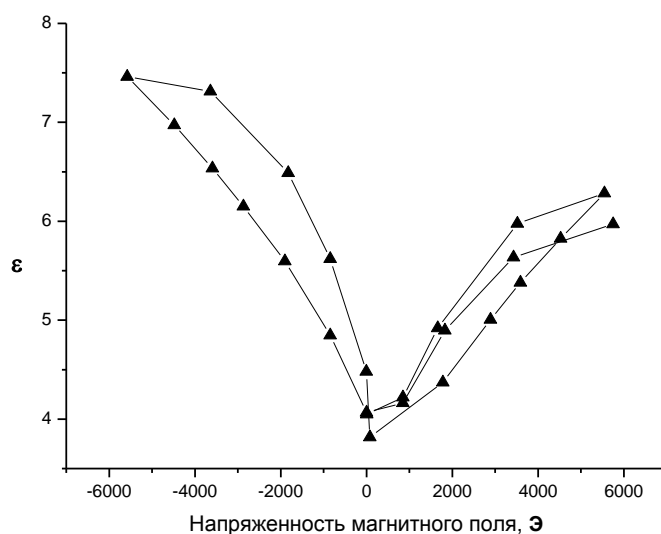
**Рис. 26** График зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ (вторая серия, FeNdB 60, 69 и 75%) от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора.



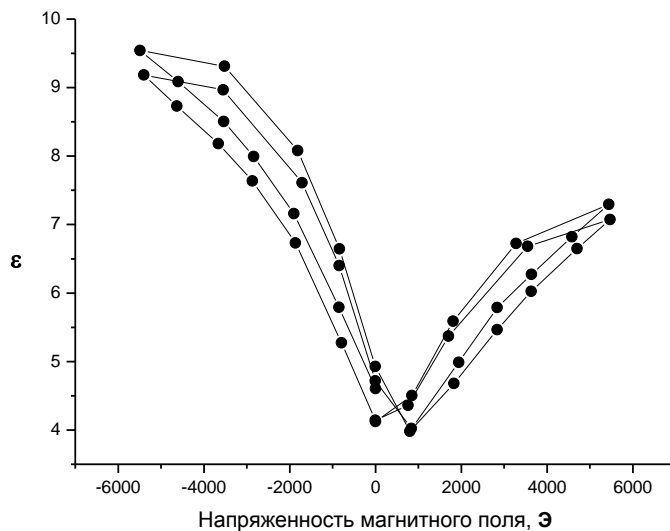
**Рис. 27** Графики зависимости тангенса угла диэлектрических потерь МРЭ (вторая серия,

FeNdB 60, 69 и 75%) в конденсаторе от величины внешнего магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора.

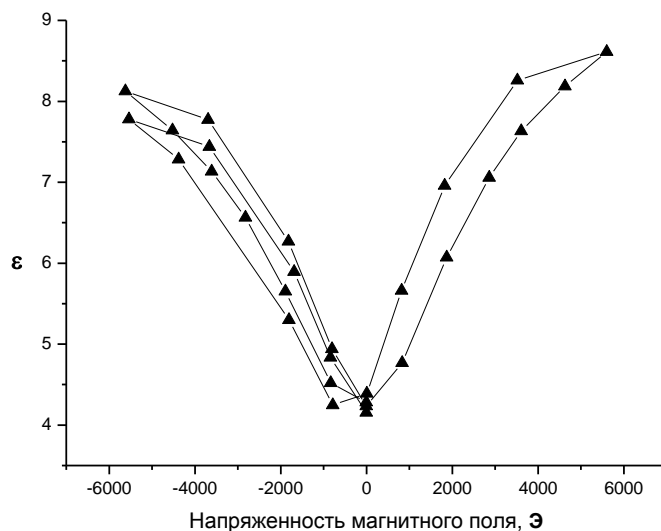
Для случая перпендикулярной ориентации наблюдается увеличение величины диэлектрической проницаемости при увеличении величины внешнего магнитного поля, порядок изменения - десятки процентов. Так же наблюдается гистерезисная зависимость при перемагничивании образца. Для МРЭ из FeNdB наблюдается несимметричная зависимость диэлектрической проницаемости от направления магнитного поля: в полях 5,5 кЭ и -5,5 кЭ значения отличаются на 25% (МРЭ FeNdB 60%). Наблюдаемую особенность можно связать с недостаточно большим магнитным полем, в результате чего частицы FeNdB не перемагничиваются в нужном направлении. Для проверки этой гипотезы образец был дополнительно намагничен в поле 8,4 кЭ, 16 кЭ и после этого проводилось определение величины диэлектрической проницаемости образца. Результаты представлены на Рис. 28, Рис. 29 и Рис. 30.



**Рис. 28** График зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ (вторая серия, FeNdB 60%) от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора. Без предварительного намагничивания.



**Рис. 29** График зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ (вторая серия, FeNdВ 60%) от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора. Образец предварительно намагничен в поле 8,4 кЭ.



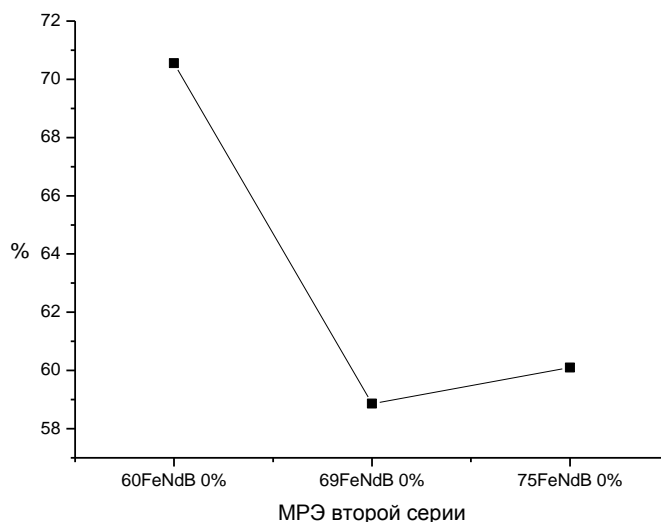
**Рис. 30** График зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ (вторая серия, FeNdВ 60%) от величины магнитного поля для перпендикулярной ориентации конденсатора. Образец предварительно намагничен в поле 16 кЭ.

В Табл. 7 приведены усредненные значения диэлектрической проницаемости образцов без внешнего магнитного поля и в максимальном поле, величина относительного (в процентах) и абсолютного изменения диэлектрической проницаемости, связанного с

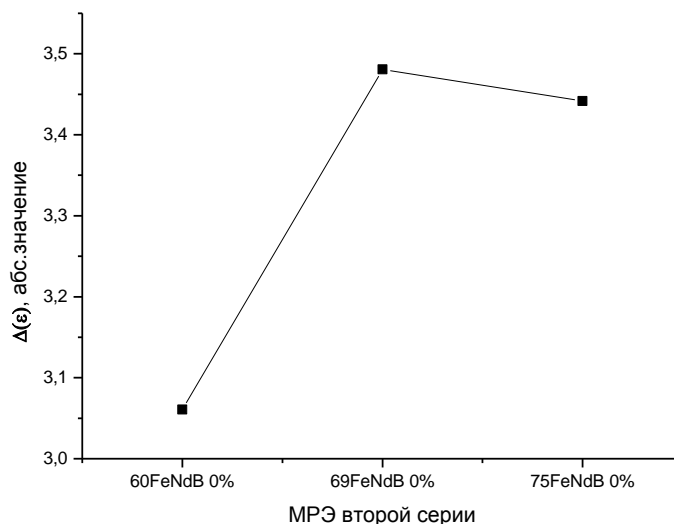
включением магнитного поля. Эти же значения отображены графически на **Рис. 31** и **Рис. 32** соответственно.

MPЭ	Поле H=0 Эε	Поле H=5,5 кЭε	Δ(ε), %	Δ(ε), абс. значение
FeNdB 60%	4,3	7,4	70	3,1
FeNdB 69%	5,9	9,4	59	3,5
FeNdB 75%	5,7	9,1	60	3,4

**Табл. 7** Таблица значений диэлектрической проницаемости MPЭ (вторая серия, FeNdB 60, 69 и 75%) в конденсаторе в максимальном магнитном поле и без него. Приведены относительные и абсолютные изменения величины диэлектрической проницаемости MPЭ.



**Рис. 31** График значений относительного изменения величины диэлектрической проницаемости различных MPЭ (вторая серия, FeNdB 60, 69 и 75%) при включении внешнего магнитного поля.

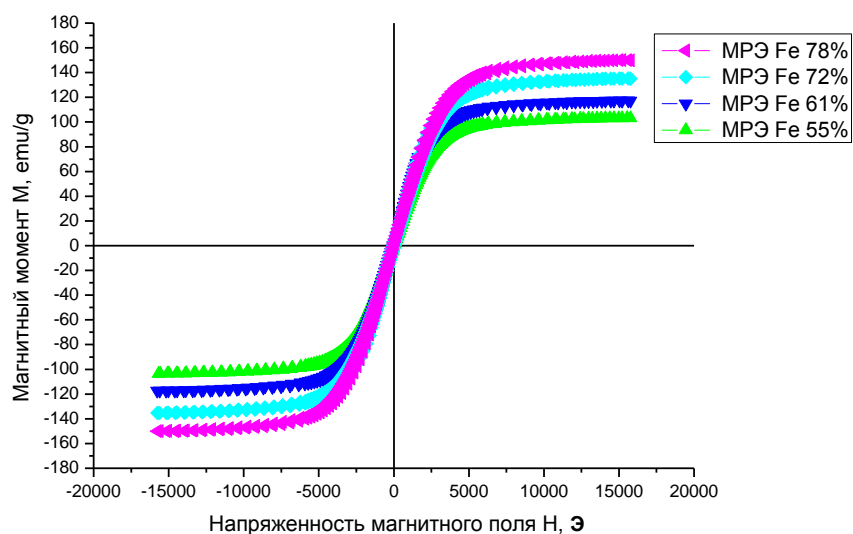


**Рис. 32** График значений абсолютного изменения величины диэлектрической проницаемости различных МРЭ (вторая серия, FeNdB 60, 69 и 75%) при включении внешнего магнитного поля.

Из полученных данных следует, что с ростом концентрации магнитных частиц железа в МРЭ величина абсолютного изменения диэлектрической проницаемости при включении внешнего магнитного поля увеличивается. Относительное же изменение диэлектрической проницаемости падает.

#### **4.6. Результаты измерения коэрцитивной силы и намагниченности насыщения МРЭ четвертого типа из Fe и FeNdB с различными концентрациями**

При помощи вибрационного магнитометра были сняты петли гистерезиса для всех образцов. Измерения проводились в магнитном поле до 16 кЭ. На **Рис. 33** приведены типичные петли гистерезиса для образцов.



**Рис. 33.** График зависимости магнитного момента **M** образцов МРЭ (первая серия, Fe 55, 61, 72 и 78%) от величины магнитного поля **H**.

В **Табл. 8** приведены величины коэрцитивной силы и намагниченности насыщения для всех образцов (FeNdB 60, 69 и 75%, Fe 55, 61, 72 и 78%). Для образцов с частицами FeNdB получились частные петли гистерезиса, поэтому для них коэрцитивная сила не вычислялась.

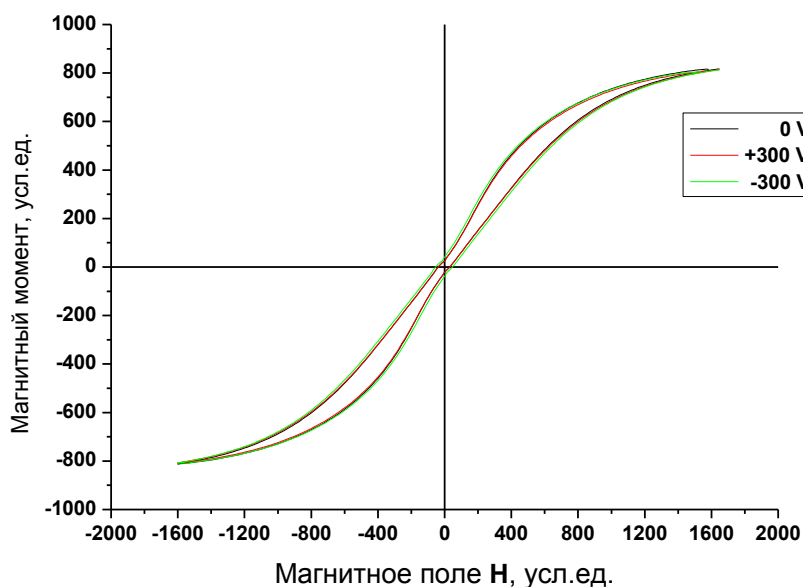
МРЭ	Намагниченность насыщения M, emu/g	Коэрцитивная сила H <sub>c</sub> , Э
FeNdB 60%	59	-
FeNdB 69%	74	-
FeNdB 75%	77	-
Fe 55%	100	32
Fe 61%	116	34
Fe 72%	135	43
Fe 78%	150	32

**Табл. 8** Таблица значений коэрцитивной силы **H<sub>c</sub>** и намагниченности насыщения **M** для МРЭ FeNdB 60, 69 и 75%, Fe 55, 61, 72 и 78%.



#### 4.7. Результаты исследования влияния электрического поля на магнитные свойства МРЭ четвертого типа из Fe и FeNdB с различными концентрациями

Для двух образцов МРЭ четвертого типа на основе Fe с концентрацией 61% масс. и FeNdB с концентрацией 75% масс. было проведено исследование влияния внешнего электрического поля на магнитные свойства. Для этого исследуемый образец помещался между обкладками плоского конденсатора, на которые подавалось постоянное напряжение 300В разной полярности. Конденсатор с образцом помещался в вибрационный магнетометр. На **Рис. 34** изображены петли гистерезиса для образцов МРЭ четвертого типа на основе Fe (61%) от величины магнитного поля для случаев приложенного напряжения -300, 0, +300В к обкладкам конденсатора. Из графиков видно, что обнаружить влияние электрического поля на магнитные свойства МРЭ не удалось. Аналогичная картина наблюдается и для второго изучаемого образца МРЭ на основе FeNdB (75%).



**Рис. 34** График зависимости магнитного момента МРЭ четвертого типа на основе Fe (61%) от величины магнитного поля для случаев приложенного напряжения -300, 0, +300В к обкладкам конденсатора.

## Глава 5. Заключение

Как уже говорилось ранее, магнитореологические эластомеры - это магнитоуправляемые композиционные материалы, способные изменять размеры, упругие свойства и другие физические параметры в магнитном поле. В данном случае рассматривались диэлектрические свойства МРЭ.

Зависимость диэлектрических свойств от величины внешнего магнитного поля связана с наличием магнитных частиц в полимерной матрице. Это подтверждается результатами измерений серии образцов, состоящей из чистого полимера без магнитных частиц и полимера с магнитными частицами, которые представлены на **Рис. 15**. Для образца без частиц диэлектрическая проницаемость не меняется с ростом величины внешнего магнитного поля. Если же взять полимер с частицами, то наблюдается увеличение  $\epsilon$  с ростом магнитного поля.

Зависимость  $\epsilon$  от величины магнитного поля связана с изменением взаимного расположения магнитных частиц в полимерной матрице. Если взять магнитные частицы, насыпать их в вязкую жидкость и приложить внешнее магнитное поле, то мы будем наблюдать смещение частиц. Частицы будут выстраиваться в цепочки вдоль силовых линий магнитного поля. Аналогичное происходит и в МРЭ. При внесении образца в магнитное поле частицы стремятся сместиться и выстроиться в цепочки вдоль силовых линий. Но из-за упругих свойств полимерной матрицы величина смещения мала. Эта гипотеза подтверждается результатами измерений серии образцов с полимерными матрицами различной жесткости. Были изучены МРЭ с одинаковыми магнитными частицами и одинаковыми массовыми концентрациями, но с различными полимерными матрицами: одна - жесткая, другая - эластичная. Измерения показали, что для МРЭ с жесткой матрицей величина эффекта (0,1% и 0,7%) меньше, чем для МРЭ с эластичной матрицей (13% и 30%). На **Рис. 12** представлены графики зависимости диэлектрической проницаемости МРЭ для образцов с различной жесткостью матриц. В **Табл. 2** приведены численные значения изменения диэлектрической проницаемости МРЭ с матрицами различной жесткости.

К тому же, из-за упругих свойств полимера наблюдается гистерезисная зависимость величины диэлектрической проницаемости от величины магнитного поля. Для более эластичных образцов наблюдается большее расхождение величины  $\epsilon$  для одного и того же значения величины магнитного поля.

Наблюдаемый эффект обладает анизотропией. В случае перпендикулярной ориентации плоскости обкладок конденсатора к направлению внешнего магнитного поля происходит увеличение величины  $\epsilon$  с ростом магнитного поля. Если же ориентация параллельная, то происходит уменьшение  $\epsilon$  с ростом магнитного поля. Этот факт подтверждается измерениями, результаты которого отображены на **Рис. 17**.

Рассмотренный эффект зависит от размеров частиц. На **Рис. 18** представлен график зависимостей диэлектрической проницаемости образцов с одинаковой концентрацией магнитных частиц, но разным размером. Величина проницаемости образца из крупных частиц почти вдвое больше, чем для образца с мелкими частицами. При этом у образца с мелкими частицами относительное изменение  $\epsilon$  больше, чем у образца с крупными частицами.

Различные концентрации магнитных частиц в МРЭ дают различные свойства. Для первой серии образцов с частицами Fe было обнаружено, что с увеличением массовой концентрации магнитных частиц происходит увеличение относительного изменения диэлектрической проницаемости образца (**Рис. 19**). Однако для образцов с частицами FeNdB нельзя говорить о монотонной зависимости (**Рис. 31** и **Рис. 32**). Позднее была изготовлена еще одна серия МРЭ с частицами Fe с различными значениями концентрация частиц с более эластичной полимерной матрицей. Это привело к обратной зависимости величины эффекта от концентрации частиц – наблюдалось уменьшение относительного изменения диэлектрической проницаемости образцов. Наблюдаемое изменение в характере зависимости связано с эластичностью полимера: благодаря мягкости матрицы магнитные частицы свободнее смещаются под действием внешнего магнитного поля, в результате чего они слипаются и образуют цельный проводник. Это подтверждается увеличением тангенса угла диэлектрических потерь с увеличением величины магнитного поля для МРЭ с эластичной матрицей (**Рис. 25**).

Было исследовано влияние внешних напряжений на зависимость  $\epsilon$  от величины магнитного поля. Образцы сжимались обкладками конденсатора на 30%. Это приводило к тому, что изменение величины диэлектрической проницаемости при внесении в магнитное поле уменьшалось (**Табл. 3**).

Обнаружить влияние внешнего постоянного электрического поля на магнитные свойства МРЭ не удалось.

В результате выполнения данной работы было обнаружено влияние внешнего постоянного магнитного поля на величину диэлектрической проницаемости

магнитореологических эластомеров. Наблюдаемый эффект связан с наличием в полимерной матрице магнитных частиц, взаимодействующих с магнитным полем. Изменение диэлектрической проницаемости связано с изменением взаимного расположения частиц в образце. Величина наблюдаемого эффекта связана с конфигурацией исследуемого образца: упругость полимерной матрицы, размеры и концентрация частиц. Эффект обладает анизотропией относительно ориентации внешнего магнитного поля и плоскости измерительного конденсатора.

## Список литературы

- [1] J. D. Carlson и M. R. Jolly, «MR Fluid, foam and elastomer devices,» *Mechatronics*, № 10, pp. 555-569, 2000.
- [2] J. M. Ginder, M. E. Nichols и L. D. Elie, «Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers,» *SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*. – *International Society for Optics and Photonics*, pp. 418-425, 2000.
- [3] J. D. Carlson, «Magnetorheological fluid actuators,» *Adaptronics and Smart Structures*, p. 180–195, 1999.
- [4] D. J. Klingenberg, «Magnetorheology: applications and challenges,» *AIChE Journal*, т. 47, № 2, pp. 246-249, 2001.
- [5] J. D. Carlson, D. M. Catanzarite и K. A. & St. Clair, «Commercial magneto-rheological fluid devices,» *International Journal of Modern Physics B*, т. 10, № 23n24, pp. 2857-2865, 1996.
- [6] T. Mitsumata, K. Ikeda, J. P. Gong, Y. Osada и D. Szabó, «Magnetism and compressive modulus of magnetic fluid containing gels,» *Journal of Applied Physics*, № 85, pp. 8451-8455, 1999.
- [7] M. R. Jolly, J. W. Bender и J. D. Carlson, «Properties and applications of commercial magnetorheological fluids,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, т. 10, № 1, pp. 5-13, 1999.
- [8] J. M. Ginder, M. E. Nichols, L. D. Elie и J. L. Tardiff, «Magnetorheological elastomers: properties and applications,» *Proceeding of SPIE*, т. 3675, pp. 131-138, 1999.
- [9] M. R. Jolly, J. D. Carlson, B. C. Muñoz и T. A. Bullions, «The magnetoviscoelastic response of elastomers composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, № 7, pp. 613-622, 1996.
- [10] M. Lokander и B. Stenberg, «Performance of isotropic magnetorheological rubber materials,» *Polymer Testing*, № 3, pp. 245-251, 2002.
- [11] I. Bica, «The influence of the magnetic field on the elastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, т. 18, № 5, pp. 1666-1669, 2012.
- [12] G. Y. Zhou, «Shear properties of a magnetorheological elastomer,» *Smart Materials and Structures*, № 12, pp. 139-146, 2003.
- [13] L. Chen, X. L. Gong и W. H. Li, «Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers,» *Smart Materials and Structures*, № 16, pp. 1-6, 2007.
- [14] L. V. Nikitin, D. G. Korolev, G. V. Stepanov и L. S. Mironova, «Experimental study of magnetoelastics,» *Jornal of magnetism and magnetic materials*, № 300, pp. 234-238, 2006.
- [15] X. L. Gong, L. Chen и J. F. Li, «Study of utilizable magnetorheological elastomers,» *International*

*Journal of Modern Physics B*, т. 21, № 28n29, pp. 4875-4882, 2007.

- [16] M. Farshad и M. Le Roux, «Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels,» *Polymer testing*, № 24, pp. 163-168, 2005.
- [17] J. M. Ginder, S. M. Clark и W. F. Schlotter, «Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers,» *International Journal of Modern Physics B*, т. 16, № 17n18, pp. 2412-2418, 2002.
- [18] G. Brändli и R. Griessen, «Two capacitance dilatometers,» *Cryogenics*, т. 13, № 5, pp. 299-302.
- [19] S. Bednarek, «The giant magnetostriction in ferromagnetic composites within an elastomer matrix,» *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, т. 68, № 1, pp. 63-67, 1999.
- [20] G. V. Stepanov, D. Y. Borin, Y. L. Raikher, P. V. Melenev и N. S. Perov, «Motion of ferroparticles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers,» *Journal of Physics: Condensed Matter*, т. 20, № 20, p. 204121, 2008.
- [21] I. Bica, «Influence of magnetic field upon the electric capacity of a flat capacitor having magnetorheological elastomer as a dielectric,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, т. 15, № 4, pp. 605-609, 2009.
- [22] I. Bica, Y. D. Liu и H. J. Choi, «Magnetic field intensity effect on plane electric capacitor characteristics and viscoelasticity of magnetorheological elastomer,» *Colloid and Polymer Science*, т. 290, № 12, pp. 1115-1122, 2012.
- [23] A. S. Semisalova, N. S. Perov, G. V. Stepanov, E. Y. Kramarenko и A. R. Khokhlov, «Strong magnetodielectric effects in magnetorheological elastomers,» *Soft Matter*, т. 9, № 47, pp. 11318-11324, 2013.
- [24] J. Rabinow, «The magnetic fluid clutch,» *AIEE Transactions of the*, т. 67, p. 1308–1315, 1948.