

**Ряполов Петр Алексеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ  
МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ  
НА ОСНОВЕ АКУСТОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

КУРСК 2010

Работа выполнена на кафедре физики Курского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Полунин Вячеслав Михайлович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Родионов Александр Андреевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент  
**Постников Евгений Борисович**

Ведущая организация: Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь).

Защита состоится 18 марта 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.04 при Курском государственном техническом университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КурскГТУ.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2010 г.

Размещен на сайте [www.kurskstu.ru](http://www.kurskstu.ru) \_\_\_\_\_ 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Рослякова Л.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Создание магнитных жидкостей (МЖ) относится к числу достижений нанотехнологий. МЖ или ферроколлоиды – это коллоидные растворы ферро- или ферромагнитных наночастиц в немагнитной жидкости-носителе. Главной особенностью МЖ в сочетании с высокой текучестью является способность взаимодействовать с внешним магнитным полем. МЖ нашли широкое применение в современной технике в качестве сред с управляемыми физическими свойствами. Существующие методы изучения нанодисперсной фазы МЖ преимущественно основаны на измерении магнитной проницаемости (или восприимчивости) коллоида и ее частотной зависимости в переменных магнитных полях. Их применимость ограничена дисперсными системами с малой вязкостью. Методы электронной и сканирующей зондовой микроскопии позволяют исследовать образцы в отвердевшем состоянии (метод реплик), без изучения кинетических свойств феррочастиц и процессов их агрегации, протекающих в МЖ при намагничивании. Поэтому физические параметры наноразмерной дисперсной фазы МЖ остаются недостаточно исследованными.

Актуальность исследований нанодисперсной фазы МЖ связана, прежде всего, с тем, что магнитные, электрические, реологические, акустические, оптические свойства этих уникальных сред определяются дисперсным составом коллоида и межчастичными взаимодействиями, которые во многом зависят от магнитных и геометрических параметров наночастиц и распределения их по размерам.

В данной работе предусматривается исследование дисперсного состава, а также магнитных и геометрических параметров наночастиц МЖ на основе акустомагнитного эффекта (АМЭ). Сущность АМЭ заключается в излучении электромагнитной волны столбиком намагниченной МЖ при распространении в нем звуковых волн. В рамках рассматриваемой модели индуцируемая в измерительном контуре ЭДС пропорциональна амплитуде колебаний намагниченности жидкости, обусловленных главным образом колебаниями концентрации частиц нанодисперсной фазы. Смещение феррочастиц в данном случае осуще-

ствляется не вопреки, а благодаря вязкому трению окружающей частицу жидкой матрицы, что расширяет применимость метода на основе АМЭ на коллоидные системы практически с любой вязкостью дисперсионной среды.

Полученные результаты могут иметь значение для нескольких областей физической науки, в частности, физики конденсированного состояния. Важно отметить, что такого рода исследования способствуют расширению области применения МЖ в качестве активных элементов различных устройств и приборов.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное исследование дисперсного состава, магнитных и геометрических параметров наночастиц магнитной жидкости на основе акустомагнитного эффекта.

**Задачи исследования:**

- разработать на основе АМЭ методику исследования и создать компьютеризованную экспериментальную установку для изучения физических параметров нанодисперсной фазы МЖ, в которой с помощью многофункционального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) будет осуществляться фильтрация полученного сигнала и разложение его в спектр для контроля уровня помех, а также определяться частота и амплитуда АМЭ;
- измерить зависимость величины амплитуды АМЭ от напряженности магнитного поля в образцах МЖ с различной концентрацией магнитной фазы;
- определить величину динамического размагничивающего фактора, характеризующего возмущение напряженности магнитного поля в центральном круговом сечении столбика МЖ в пределах одной стоячей волны при взаимно перпендикулярной ориентации векторов колебательной скорости и напряженности магнитного поля;
- дать теоретическое описание наблюдаемой зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля с использованием моделей намагничивания МЖ, учитывающих полидисперсность частиц и межчастичные взаимодействия;

- оценить магнитные и геометрические параметры наночастиц и получить их распределение по размерам на основе анализа зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля;
- предложить алгоритм построения кривых намагничивания МЖ по данным исследования зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля.

### **Научная новизна диссертации:**

1. Создана компьютеризированная экспериментальная установка и разработана методика исследования физических параметров нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ.
2. Дана теоретическая интерпретация зависимости амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля с учетом динамического размагничивающего фактора, полидисперсности частиц и межчастичных взаимодействий.
3. Произведена оценка магнитных и геометрических параметров частиц нанодисперсной фазы МЖ и получено их распределение по размерам на основе анализа зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля.
4. Предложен новый вариант построения кривых намагничивания МЖ на основе анализа зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля.

### **Автор выносит на защиту:**

1. Методику и компьютеризированную экспериментальную установку для исследования физических параметров нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ при взаимно перпендикулярной ориентации векторов колебательной скорости и напряженности магнитного поля.
2. Экспериментально полученные зависимости амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля в исследованных образцах МЖ.
3. Данные о дисперсном составе МЖ и физических параметрах диспергированных наночастиц, полученные на основе АМЭ.

4. Алгоритм построения кривых намагничивания МЖ по данным исследования зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля и результаты, полученные на его основе.

**Достоверность** экспериментальных исследований подтверждается: использованием поверенной измерительной техники и высокоточного аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающего компьютерную обработку результатов эксперимента; совпадением данных нескольких независимых между собой экспериментов, проведенных на одних и тех же образцах; удовлетворительным согласованием между данными, полученными на основе измерения относительной амплитуды АМЭ и с использованием традиционных методик (магнитогранулометрии (МГА) и атомно-силовой микроскопии (АСМ)).

**Практическая значимость работы** заключается в том, что на основе полученных результатов может быть создан новый метод исследования дисперсного состава МЖ и определения физических параметров магнитных наночастиц, дополняющий существующие методы.

**Апробация работы.** Материалы диссертации представлялись на Научно-технической конференции «Вибрация 2008» (Курск, 2008); IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2008); 13 Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям (Иваново, 2008); XX сессии Российского акустического общества (Москва, 2008); I Международной научной конференции «Актуальные проблемы молекулярной акустики и теплофизики» (Курск, 2008); IX Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкости», (Санкт-Петербург, 2009); II Всероссийской научной конференции «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» (Ставрополь, 2009 г.); I Всероссийской конференции «Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: Наномех-2009» (Нижний Новгород, 2009); Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов» (Белгород, 2009).

**Публикации.** Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 15 работах, из них 3 - в рекомендованных ВАК научных журналах.

Исследования, представленные в диссертации, выполнены при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гранты ФАО НК-387П, НК-410П), АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы" (мероприятие 1 Тематический план ФАО 2009, тема № 1.8.09.).

**Личный вклад автора.** Разработана методика и создана компьютеризированная экспериментальная установка для исследования физических параметров нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ; выполнен весь объем экспериментальных исследований; по результатам акустомагнитных измерений построены кривые распределения частиц по размерам и кривые намагничивания МЖ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 120 страницах, содержит 32 рисунка, 5 таблиц и 132 наименования цитируемой литературы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель, задачи и основные положения, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В главе 1 представлен обзор ранее опубликованных работ. Рассмотрены общие сведения о МЖ. Особое внимание уделено современным методам исследования магнитных коллоидов, определены границы применимости существующих методик. На основании представленного литературного обзора сделаны выводы и обозначены задачи, требующие своего решения.

В главе 2 дано описание созданной компьютеризированной экспериментальной установки для исследования физических параметров нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ, определены оптимальные условия эксперимента. Схематическое изображение установки представлено на рис. 1. Установленная вертикально стеклянная трубка с плоским дном 1 заполнена МЖ 2. Источником звуковых колебаний (излучателем) служила пьезоэлектрическая пластина 3, на которую с генератора 4 подавалось переменное электрическое напряжение

заданной частоты  $\nu$ . Частота контролировалась частотомером 5, а напряжение - вольтметром 6. Упругие волны через волновод 7 вводились в МЖ. Измерительная катушка полукруглой формы 8, размещенная в непосредственной близости от

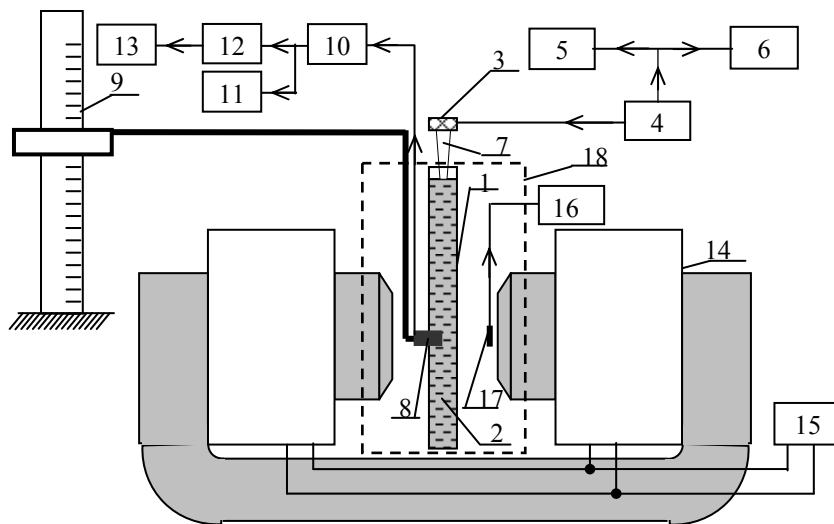


Рис. 1. Блок-схема компьютеризированной экспериментальной установки

внешней поверхности трубки, была жестко связана с кинематическим узлом катетометра 9. Полезный сигнал усиливался и фильтровался селективным нановольтметром 10 (Unipan 232), с выхода которого сигнал подавался на осциллограф 11 (С1 – 117) и АЦП 12 (NI USB-6251 BNC), соединенный с ноутбуком 13. Магнитное поле создавалось электромагнитом 14 (ФЛ-1), подключенным к источнику питания 15. Значение магнитной индукции измерялось тесламетром 16, снабженным датчиком Холла 17. Термостатирование осуществлялось при помощи термостата 18.

Приведена блок-схема программы, разработанной в среде NI LabView, с помощью которой осуществлялась фильтрация полученного сигнала и разложение его в спектр для контроля уровня помех и определялась частота и амплитуда АМЭ. В ней также рассчитывались параметры распределения наночастиц МЖ по размерам, а по данным акустомагнитных исследований осуществлялось построение графиков теоретических зависимостей относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля и кривых намагничивания.

Определены оптимальные условия для исследования нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ в поперечном к магнитожидкостному столбику магнитном поле. Рассмотрена методика измерений «вспомогательных» параметров МЖ: плотности жидкости  $\rho$ , концентрации твердой фазы  $\varphi$ , начальной магнитной восприимчивости  $\chi$ , намагниченности насыщения  $M_s$ .



В главе 3 приведены данные экспериментального исследования физических параметров и представлены зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины магнитного

Таблица 1.

поля в образцах МЖ1-МЖ4. Объектом исследования выбрана МЖ типа «магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в керосине» с олеиновой кислотой в роли ПАВ. Образцы бы-

| Образец                    | МЖ1     | МЖ2     | МЖ3     | МЖ4     |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Жидкость-носитель          | Керосин | Керосин | Керосин | Керосин |
| $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | 1360    | 1115    | 1028    | 882     |
| $\varphi$ , %              | 13,0    | 7,4     | 5,4     | 2,1     |
| $\chi$                     | 4,2     | 3,3     | 2,3     | 0,8     |
| $M_s$ , кА/м               | 58      | 33      | 25      | 10      |

ли приготовлены разбавлением одного базового коллоида МЖ1. Значения «вспомогательных» параметров этих образцов приведены в таблице 1.

Дисперсный состав МЖ определялся по данным АСМ и МГА. Изображение скана МЖ1, полученное в лаборатории ЦКП «Наукоемкие технологии» методом полуконтактной АСМ на сканирующем зондовом микроскопе Smart Spm, изготовленного компанией Aist NT, показано на рис. 2. Намагниченность МЖ измерялась баллистическим методом. Кривые намагничивания  $M(H)$  для всех образцов приведены на рис. 3.

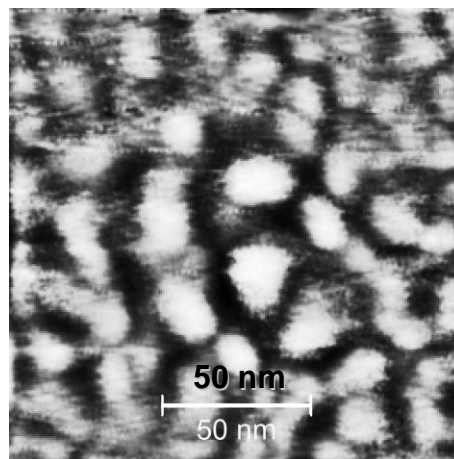


Рис. 2. Скан МЖ-1 на атомно-силовом микроскопе

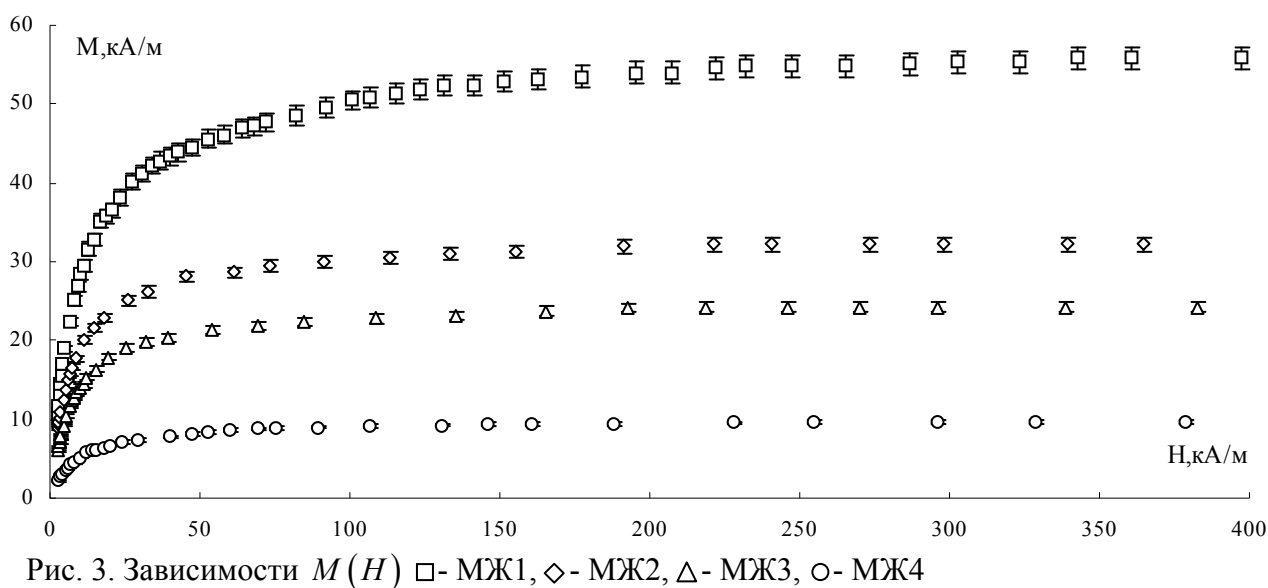


Рис. 3. Зависимости  $M(H)$  □- МЖ1, ◇- МЖ2, △- МЖ3, ○- МЖ4

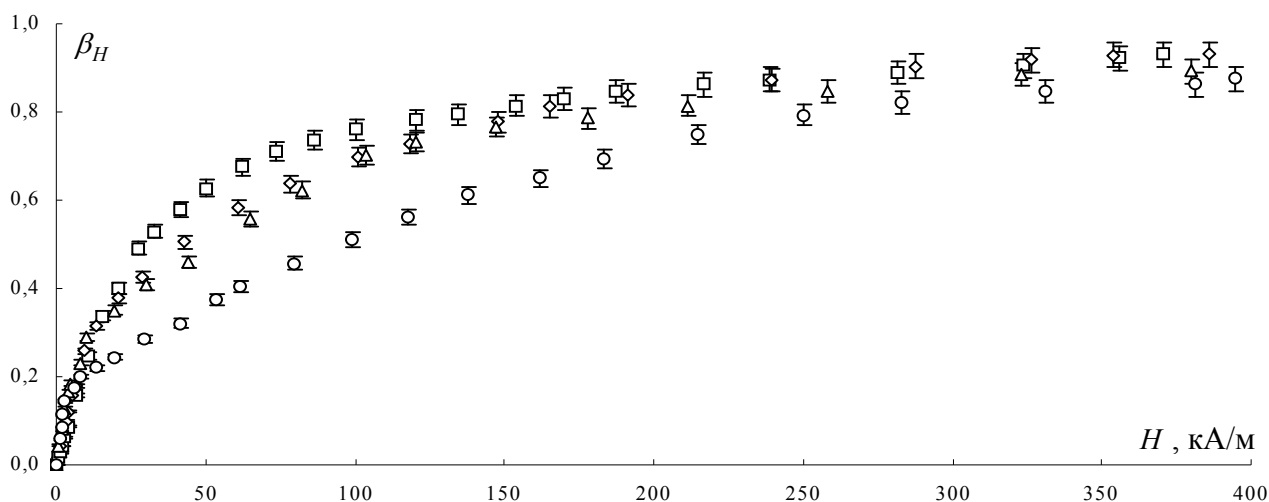


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля  
 $\square$  - МЖ1,  $\diamond$  - МЖ2,  $\triangle$  - МЖ3,  $\circ$  - МЖ4

Зависимости амплитуды АМЭ от величины магнитного поля определялись при поддерживаемой постоянной температуре и амплитуде напряжения на пьезоэлементе  $U=30$  В. На некоторых частотах вводимых звуковых колебаний в системе МЖ-цилиндрическая оболочка возбуждались стоячие волны (установка - рис. 1). Перемещением катетометра измерительная катушка устанавливалась в пучность стоячей волны в области наиболее однородного магнитного поля. Максимальная амплитуда сигнала АМЭ достигалась изменением положения звукового излучателя и частоты звуковых колебаний, на которой при неизменном напряжении на пьезоэлементе измерялась зависимость ЭДС  $e_0$ , индуцируемой в измерительной катушке, от величины напряженности магнитного поля. Максимальная величина ЭДС  $e_{0\max}$ , соответствующая насыщению МЖ, определялась по экстраполяции прямолинейного участка кривой  $e_0=f(H^{-1})$  при  $H \rightarrow \infty$ . Зависимости амплитуды АМЭ в относительных единицах  $\beta_H = e_0/e_{0\max}$  для образцов МЖ1-МЖ4 показаны на рис. 4.

Полученные данные показывают, что зависимость относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля имеет сходство с Ланжевеновской кривой намагничивания. На наклон прямолинейного начального участка влияют «крупные» частицы нанодисперсной фазы МЖ, тогда как вид зависимости  $\beta_H(H)$  в окрестности магнитного насыщения ( $H \approx 400$  кА/м) определяется вкладом частиц «мелкой» фракции.

В главе 4 представлен анализ экспериментальных данных, и дана теоретическая интерпретация зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля, полученная с использованием известных моделей намагничивания МЖ, учитывающих полидисперсность частиц и межчастичные взаимодействия.

Если намагниченность МЖ подчиняется закону Ланжевена, то относительная амплитуда АМЭ  $\beta_\xi$  для монодисперсного ферроколлоида может быть представлена в виде функции параметра  $\xi = \mu_0 m^* H / k_0 T$  (Полунин В. М. // Физматлит -2008):

$$\beta_\xi = \frac{L(\xi) - k' \cdot D(\xi)}{1 + N_d M_S \mu_0 m^* / k_0 T \cdot \xi^{-1} \cdot D(\xi)}, \quad (1)$$

где  $L(\xi)$  - функция Ланжевена;  $D(\xi) = (\xi^{-1} - \xi \operatorname{sh}^{-1} \xi)$ ;  $k' = q c^2 C_p^{-1}$ ;  $q \equiv -\rho^{-1} \partial \rho / \partial T$  - температурный коэффициент;  $c$  - скорость распространения звука в МЖ в отсутствие магнитного поля;  $C_p$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении и постоянной напряженности магнитного поля;  $m^*$  - магнитный момент наночастицы;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>;  $N_d$  - динамический размагничивающий фактор, обусловленный возмущением намагниченности в центральном круговом сечении столбика МЖ при взаимно перпендикулярной ориентации векторов колебательной скорости и напряженности магнитного поля.

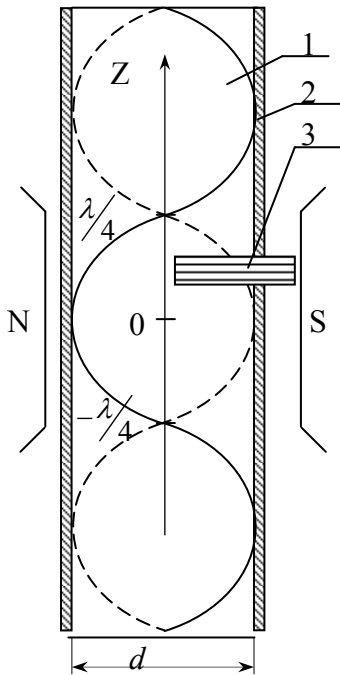


Рис. 5. Схема задачи для оценки фактора  $N_d$

Для оценки  $N_d$  использовалась схема задачи, представленная на рис. 5. МЖ 1 заполняла стеклянный цилиндр 2, индикатором сигнала АМЭ служила узкая (по сравнению с длиной волны) измерительная катушка 3. В системе МЖ-цилиндрическая оболочка возбуждалась система стоячих волн. Магнитное поле перпендикулярно оси цилиндра (оси Z). Возмущение намагниченности МЖ в фазе сжатия среды задано уравнением:

$$\Delta M = \Delta M_m \cdot \cos kz.$$

Введем новую переменную - параметр формы  $P \equiv (z -$

$-(-z))/d=2z/d$ . Изменение намагниченности в цилиндре с координатами основания  $\pm z$  вызывает приращение размагничивающего поля в нем:

$$dH = -N_c dM = -kd/2 \cdot N_c \Delta M_m \cdot \sin(kPd/2) \cdot dP,$$

где  $N_c$  - размагничивающий фактор для магнетика в форме цилиндра, намагниченного в поперечном к его оси магнитном поле. Размагничивающий фактор зависит от параметра формы, т.е.  $N_c=f(P)$ , который может аппроксимироваться зависимостью:  $N_c=b'(1-e^{-b''P})$ . Коэффициенты  $b'$ ,  $b''$  определялись по известным значениям  $N_c$ . (Тикадзуми С. // М.: Мир – 1983).

С учетом этого, для оценки  $N_d$  в пределах, ограниченных координатами  $z=\pm\lambda/4$ , получено:

$$N_d = b' \left[ 1 + \pi d \left( b'' \cdot e^{-b''\lambda/2d} - \pi d/\lambda \right) \left( \lambda \cdot \left\{ b''^2 + (\pi d/\lambda)^2 \right\} \right)^{-1} \right].$$

Для модельного описания дисперсного состава магнитных частиц МЖ, полученного по результатам акустомагнитных измерений, было выбрано двухпараметрическое  $\Gamma$ -распределение (Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. // JMMM – 1996). Функция распределения определялась выражением:

$$f(x) = \frac{x^\alpha \exp(-x/x_0)}{x_0^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)}, \quad (2)$$

где  $\Gamma(\alpha+1)$ - гамма-функция,  $x$  - диаметр наночастицы,  $x_0$ ,  $\alpha$  - параметры распределения:

$$\frac{(\alpha+5)^3 - \alpha - 5}{(\alpha+2)^3 - \alpha - 2} = \frac{\langle m_*^2 \rangle}{\langle m_* \rangle^2}, \quad x_0^3 = \frac{6\langle m_* \rangle}{\pi M_{SO}(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}, \quad (3)$$

где  $\langle m_*^2 \rangle$  - средний квадрат магнитного момента,  $\langle m_* \rangle$  - средний магнитный момент,  $M_{SO}$ - намагниченность насыщения дисперсной фазы (для магнетита  $M_{SO}=480$  кА/м).

На этой основе из формулы (1) получено выражение для относительной амплитуды АМЭ:

$$\beta_{\xi L} = \frac{\int_0^\infty L(\xi) f(x) dx - k' \int_0^\infty \xi \left( \xi^{-2} - sh^{-2} \xi \right) f(x) dx}{1 + N_d \mu_0 n / k_0 T \int_0^\infty m_*^2(x) \left( \xi^{-2} - sh^{-2} \xi \right) f(x) dx}. \quad (4)$$

В предельных случаях формула (4) принимает вид:

$$\text{при } H \rightarrow 0 \quad \beta_H = \frac{(1-k') \cdot \chi_L}{M_S(1+N_d\chi_L)} H, \text{ откуда } \langle m_*^2 \rangle = \frac{3k_0 T M_S \cdot \operatorname{tg} \theta}{\mu_0 n (1-k' - N_d M_S \cdot \operatorname{tg} \theta)}, \quad (5)$$

где  $\theta$  - угол наклона начального участка зависимости  $\beta_H(H)$ ,  $n$  - числовая плотность частиц,  $\chi_L$  - начальная магнитная восприимчивость;

$$\text{при } H \rightarrow \infty \quad \beta_H = 1 - \frac{(1+k')nk_0T}{\mu_0 M_S H}, \text{ откуда } \langle m_* \rangle = \frac{(1+k')k_0T}{\mu_0 \cdot \operatorname{tg} \Omega}, \quad (6)$$

где  $\Omega$  - угол наклона участка кривой  $\beta_H(H^{-1})$  при  $H \rightarrow \infty$ .

Выражения (2)-(6) позволяют найти распределение нанодисперсной фазы МЖ по размерам на основе результатов исследования АМЭ. Приближенное значение намагниченности насыщения определялось из выражения:

$$M_s = M_{so} \cdot \varphi_M \approx M_{so} \cdot \varphi/a, \quad (7)$$

где  $a$  - коэффициент, связывающий значения объемной концентрации твердой и магнитной фазы дисперсной системы (в расчетах принимаем  $a = 1,1$ ).

Поскольку модель Ланжевена применима только для разбавленных ферроколлоидов, учет межчастичных взаимодействий в концентрированных МЖ производился с использованием модифицированной модели эффективного поля MMF2 (Ivanov A.O., Kuznetsova O. B. // Phys. Rev. E. – 2001). Намагниченность в рамках данной модели задается уравнениями:

$$M(H) = n \int_0^\infty m_*(x) L(\xi_e) f(x) dx, \quad \xi_e = \frac{\mu_0 m_*(x)}{kT} \left( H + \frac{M_L(H)}{3} + \frac{1}{144} M_L(H) \frac{dM_L}{dH} \right). \quad (8)$$

Подставляя в зависимость (4) значение параметра  $\xi_e$ , определяемого из выражения (8), получим формулу для относительной амплитуды АМЭ  $\beta_{\xi_e}$  в полидисперсной МЖ с учетом межчастичных взаимодействий:

$$\beta_{\xi_e} = \frac{\int_0^\infty L(\xi_e) f(x) dx - k' \int_0^\infty \xi_e (\xi_e^{-2} - sh^{-2} \xi_e) f(x) dx}{1 + \frac{N_d \mu_0}{k_0 T} n \int_0^\infty m_*^2(x) (\xi_e^{-2} - sh^{-2} \xi_e) f(x) dx}. \quad (9)$$

Физические параметры частиц нанодисперсной фазы МЖ, рассчитанные с использованием выражения (9) на основе АМЭ, представлены в таблице 2 для сравнения вместе с данными МГА. Средний диаметр магнитного ядра наноча-

стицы определялся по формуле  $\langle x \rangle = x_0(\alpha + I)$ , а величина дисперсии распределения наночастиц по размерам – из выражения  $\sigma = (\alpha + I)^{-1/2}$ .

Таблица 2

| Образец  | МЖ1  |                     | МЖ2  |                     | МЖ3  |                     | МЖ4  |                     |
|--|------|---------------------|------|---------------------|------|---------------------|------|---------------------|
| Методика   | МГА  | АМЭ,<br>15035<br>Гц | МГА  | АМЭ,<br>14869<br>Гц | МГА  | АМЭ,<br>18970<br>Гц | МГА  | АМЭ,<br>14839<br>Гц |
| $\langle m_* \rangle \cdot 10^{19}, \text{А} \cdot \text{м}^2$       | 2,2  | 1,9                 | 3,8  | 1,3                 | 4,2  | 1,4                 | 4,0  | 0,9                 |
| $\langle m_*^2 \rangle \cdot 10^{38}, (\text{А} \cdot \text{м}^2)^2$ | 8,7  | 12,6                | 22,3 | 5,4                 | 25,9 | 8,3                 | 25,5 | 5,6                 |
| $\langle x \rangle, \text{нм}$                                       | 8,8  | 7,6                 | 11,0 | 6,7                 | 11,4 | 6,6                 | 11,0 | 5,2                 |
| $\sigma$   | 0,29 | 0,46                | 0,23 | 0,45                | 0,22 | 0,51                | 0,25 | 0,64                |

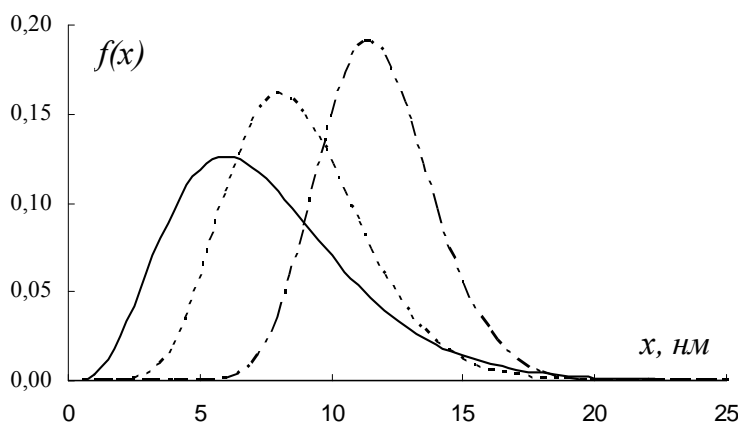


Рис.6. Распределение частиц МЖ 1 по размерам  
----- МГА, ——— - АМЭ, - · - · - АСМ

магнитного ядра  $\langle x \rangle$ , определенного исследованием на основе АМЭ (табл. 2), по-видимому, объясняется наличием стабилизирующей оболочки и тонкого немагнитного слоя на поверхности магнитной частицы.

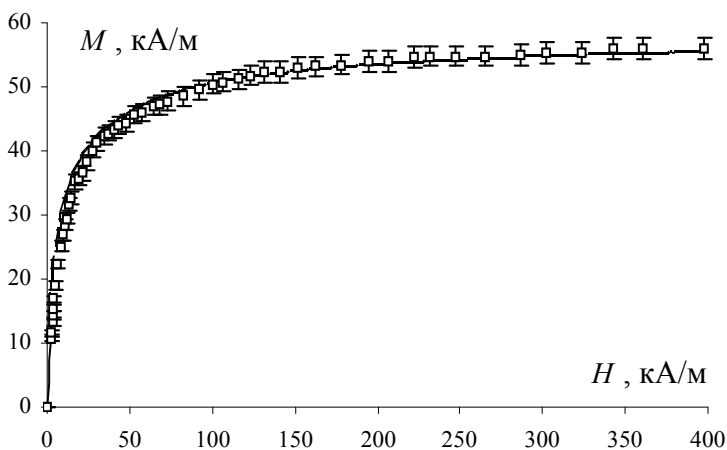


Рис.7. Кривая намагничивания МЖ1 (точки – эксперимент, кривая – расчет на основе данных АМЭ)

Кривые распределения частиц по размерам, полученные по данным АСМ, МГА и исследования на основе АМЭ (использовалась модель MMF2), представлены на рис. 6. Различие величины среднего диаметра частицы  $\langle x \rangle_{\text{АСМ}} = 11,6$  нм, измеренного АСМ, и диаметром

В среде NI LabView реализован алгоритм построения кривой намагничивания МЖ по данным акустомагнитного эксперимента и теоретической зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля. Результаты построения в разра-

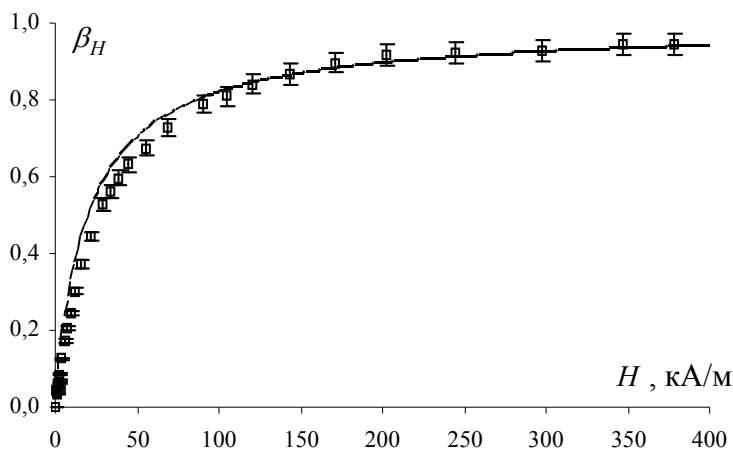


Рис. 8. Теоретическая зависимость амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля для МЖ1, точки – эксперимент

ботанной программе в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис.7 и рис.8 соответственно.

Для образца МЖ1 из зависимости вязкости от величины магнитного поля получено, что отношение большей полуоси эллипсоидальной частицы к меньшей равно:  $S=10,8$ . Сред-

ний диаметр частиц дисперсной фазы в образце МЖ1 (без учета стабилизирующей оболочки), полученный по данным акустомагнитного эксперимента, равен  $\langle x \rangle = 7,6$  нм. Объединяя эти результаты, можно оценить геометрические параметры магнитных наноагрегатов: длина малой полуоси эллипсоида вращения  $B = \langle x \rangle S^{-1/3} = 3,4$  нм, длина большой полуоси –  $A = B \cdot S = 37$  нм.

Использование акустомагнитной диагностики может быть полезным при получении образцов МЖ с заданными физическими свойствами. Методика исследования нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ совместно с другими методиками изучения их физических свойств позволит создать комплекс по управляемому синтезу МЖ с целью последующего применения их в качестве активных элементов в современных устройствах, в том числе в дозирующих и перекачивающих.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработана методика, создана компьютеризированная экспериментальная установка для исследования физических параметров нанодисперсной фазы МЖ на основе АМЭ в системе МЖ-цилиндрическая оболочка при взаимно перпендикулярной ориентации векторов колебательной скорости и напряженности магнитного поля.
2. Получено выражение для величины динамического размагничивающего фактора, обусловленного возмущением намагниченности в центральном круго-

вом сечении столбика МЖ в пределах одной стоячей волны при взаимно перпендикулярной ориентации векторов колебательной скорости и напряженности магнитного поля.

3. Дано теоретическое описание зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля с учетом размагничивающего фактора, полидисперсности частиц и межчастичных взаимодействий.

4. На основе анализа зависимости относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля произведена оценка магнитных и геометрических параметров частиц нанодисперсной фазы МЖ и определено их распределение по размерам. Полученные данные сопоставимы с результатами МГА и АСМ.

5. Расчетная кривая намагничивания, построенная с использованием результатов измерения АМЭ, находится в удовлетворительном согласии с экспериментальной кривой намагничивания, полученной на основе прямых измерений.

6. Для оценки геометрических параметров цепочечных наноагрегатов предложено объединить результаты зависимости вязкости и относительной амплитуды АМЭ от величины напряженности магнитного поля.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В рекомендованных ВАК научных журналах и изданиях:

1. Карпова, Г. В. Об одной колебательной системе с магнитожидкостным инерционно-вязким элементом [Текст] / Г. В. Карпова, В. М. Полунин, П. А. Ряполов [и др.] // Акуст. журн. – 2010. – Т. 56. – № 2. – С. 197–203.
2. Karpova, G.V. On the dissipation processes in the oscillating system with a magneto-liquid element [Text] / G.V. Karpova, A.N. Kutuev, P.A. Ryapolov [et al.] // Magnetohydrodynamics – 2009. – V. 45. – № 1. – P. 85–94.
3. Kovarda, V. V. On the strength properties of the magnetic fluid membrane [Text] / V.V. Kovarda, P.A. Ryapolov, S. S. Khotynyuk [et al.] // Magnetohydrodynamics. – 2007. – V. 43. – № 3 – P. 333 – 344.



В других журналах и изданиях:

4. Карпова, Г. В. Гидроакустические преобразователи на основе дисперсных сред с магнитными наночастицами [Текст] / Г.В. Карпова, В.М. Полунин, П.А. Ряполов [и др.] // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2008. – С. 583 – 587.
5. Полунин В. М., Вибрационные методы в лекционном эксперименте [Текст] / В. М. Полунин, А. Н. Кутуев, П. А. Ряполов [и др.] // Вибрационные машины и технологии: сб. науч. тр. / Курск. гос. тех. ун-т. – Курск, 2008. – С. 890–896.
6. Полунин, В. М. Индикация вращательных колебаний магнитных наночастиц [Текст] / В.М. Полунин, П.А. Ряполов // Ультразвук и термодинамические свойства вещества: сб. научн. тр.: Вып. 34-35. – Курск, 2008. – С. 130–137.
7. Карпова, Г.В., Некоторые особенности акустомагнитного эффекта в магнитной жидкости [Текст] / Г. В. Карпова, В.М. Полунин, П.А. Ряполов [и др.] // Сб. тр. 13 Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Иваново, 2008. – С.100 – 107.
8. Полунин, В. М. Акустическая индикация вращательных колебаний магнитных наночастиц [Текст] / В.М. Полунин, В.М. Пауков, П.А. Ряполов // Матер. XX сессии Российского акустического общества. – Москва, 2008. – С. 108 – 112.
9. Полунин, В. М. Влияние структуры магнитной жидкости на её реологические и акустические свойства [Текст] / В.М. Полунин, А.Н. Кутуев, П.А. Ряполов // Ультразвук и термодинамические свойства вещества: сб. научн. тр.: Вып. 36: матер. I Международной научной конференции «Актуальные проблемы молекулярной акустики и теплофизики» – Курск, 2008 – С. 150 – 154.
10. Полунин, В. М. Акустический анализ физических параметров нанодисперсных магнитных жидкостей [Текст] / В.М. Полунин, П.А. Ряполов // Сборник докладов IX Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкости». – СПб: СОЛО, 2009. – С. 26 – 31.

11. Полунин, В. М. Результаты НИР в учебном процессе [Текст] / В. М. Полунин, П. А. Ряполов, С. С. Хотынюк [и др.] // Тезисы докладов Совещания заведующих кафедрами физики вузов России. – М., 2009. – С. 247–249.
12. Полунин, В. М. Акустический анализ физических параметров наночастиц магнитной жидкости [Текст] / В.М. Полунин, В.М. Пауков, П.А. Ряполов // Сборник научных трудов II Всероссийской научной конференции «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем». – Ставрополь, 2009 – С. 85 – 92.
13. Полунин, В. М. Акустогранулометрия наночастиц магнитной жидкости [Текст] / В. М. Полунин, П. А. Ряполов // Известия КурскГТУ. – Курск, 2009. – № 3(28). – С. 29-36.
14. Пат. 2366903 Российская Федерация, МПК G 01 F 11/00. Дозатор газа [Текст] / С.Г. Емельянов, В.М. Полунин, П.А. Ряполов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Курск. гос. тех. ун-т. – № 2008106301/28 ; заявл. 18.02.2008; опубл. 10.09.09, Бюл. № 25. – 6 с. : ил.
15. Ряполов, П. А. Акустометрический анализ дисперсного состава магнитных жидкостей [Текст] / П. А. Ряполов // Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов: материалы Всерос. конф. с элементами научной школы для молодежи. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2009. – С. 144 – 148.

Подписано в печать .02.2010г. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Печ.л. 1 . Тираж 100 экз. Заказ\_\_\_\_\_ .

Курский государственный технический университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

