

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ

УДК 537.84: 537.621: 544.77.032

**Сухоцкий Альберт Борисович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ  
ДИСПЕРСИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в УО «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, доцент **Вислович А.Н.**, УО «Белорусский государственный технологический университет», кафедра физики

Официальные оппоненты: доктор технических наук **Баев А.Р.**, Институт прикладной физики НАН Беларуси;

доктор физико-математических наук, профессор **Краков М.С.**, УО «Белорусский государственный технологический университет», кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии»

Оппонирующая организация ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси

Защита состоится « » 2004 года в часов на заседании Совета по защите диссертаций Д.01.16.01 в Институте прикладной физики НАН Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая 16, тел. ученого секретаря Совета (017) 284-23-07

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики НАН Беларуси

Автореферат разослан « » 2004 года

Ученый секретарь  
Совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор

А.А. Лухвич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В технических и биомедицинских приложениях все более востребованными становятся магнитоуправляемые текучие среды. Природные жидкости не обладают достаточно сильными, имеющими значение для приложений, магнитными свойствами. Этот пробел заполняют путем создания композиционных материалов, таких, как магнитные жидкости [общие вопросы - Баштовой и др., 1985; Берковский и др., 1989; Блум и др., 1989; применение в машиностроение – Орлов и др., 1993; применение в дефектоскопии - Прохоренко, Баев и др., 1999], магнито- и электрореологические суспензии [Шульман, Кордонский, 1982; Коробко, 1996] и т.д. Технологическую основу этих материалов составляют разнообразные образцы дисперсий твердых ферромагнетиков в диа- и парамагнитных жидкостях-носителях, которые обладают широким спектром текучих и магнитных характеристик, различным уровнем агрегативной и седиментационной стабильности. Магнитожидкостные дисперсии (МЖ дисперсии) находят применение в дефектоскопических, измерительных, сепарационных, шлифовальных, демпфирующих, смазывающих, уплотняющих, гидравлических, теплообменных, медицинских и многих других устройствах.

Исследование свойств этих материалов осуществляют, как правило, при воздействии однородного магнитного поля, однако в эксплуатационных условиях они, обычно, подвержены воздействию неоднородного поля. Более того, во многих случаях основные эффекты, которые обеспечивают их практическое использование, обусловлены взаимодействием с неоднородным полем. Неоднородность магнитного поля является фактором, который может приводить к нарушению однородного распределения феррофазы по объему жидкости и, следовательно, к существенному изменению свойств материала.

Таким образом, существующие методы исследования не позволяют в должной мере прогнозировать поведение магнитоуправляемых жидкостей в условиях эксплуатации, что осложняет разработку магнитожидкостных устройств. Поэтому разработка методов контроля и изучения свойств магнитоуправляемых жидкостей под воздействием неоднородного поля является актуальной задачей такой отрасли знаний, как приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

**Связь работы с крупными программами, темами.** Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ Белорусской государственной политехнической академии и Белорусского государственного технологического университета в рамках следующих проектов и тем:

1. Государственная программа фундаментальных исследований РБ «Механика динамических систем и процессы управления» на 1996–2000 г. (№ГР 19983592). Задание «Механика» раздел «Исследование гидродинамики многокомпонентных магнитожидкостных систем»;

2. Государственная программа фундаментальных исследований РБ «Разработка научных основ создания экологически безопасных энергетических источников и энергосберегающих теплообменных технологий и техники» на

1996–2000 г. (№ГР 19975232). Задание «Энергетика–59» раздел «Разработка новых физических принципов электромагнитного управления процессами теплообмена с использованием магнитных жидкостей и создание новых технологий и устройств на их основе»;

3. Государственная программа фундаментальных исследований РФ «Исследование явлений и процессов генерации, переноса и преобразования энергии в термодинамических системах и энергетических технологиях» на 2000–2005 г. (№ГР 2001824). Задание «Энергия–73» раздел «Разработка новых принципов управления процессами преобразования энергии с использованием магнитных жидкостей и создание на их основе новых энергоэффективных устройств»;

4. Государственная программа фундаментальных исследований РФ на 2000–2005 г. Задание «Диагностика–25» раздел «Исследование магнитостатического поля феррожидкостных дисперсий, намагничиваемых периодически распределенным источником, разработка методов контроля свойств этих материалов».

**Цели и задачи исследования.** Цель диссертационной работы – установление закономерностей распределения магнитного поля МЖ дисперсий и сил, действующих на поверхности контактирующих с ними твердых тел, в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью модуля напряженности и разработка на их основе магнито- и силовметрических методов контроля МЖ дисперсий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать источник неоднородного магнитного поля (первичного, намагничивающего поля), удобного для теоретического исследования и экспериментального определения магнитных, механических и седиментационных свойств МЖ дисперсий;
- изучить распределение магнитного поля слоя дисперсии (вторичного поля) и установить зависимости его параметров от характеристик первичного поля, геометрических и магнитных параметров образца дисперсии;
- изучить зависимости параметров вторичного поля и гидростатических сил, действующих на погруженную в МЖ дисперсию немагнитную пластину, от характеристик первичного поля, образца дисперсии и положения пластины;
- разработать способы контроля стабильности МЖ дисперсий, их магнитных и механических характеристик в неоднородном магнитном поле.

**Объект и предмет исследования.** Разработанную методику можно использовать для контроля широкого круга композиционных материалов, обобщенно называемых магнитожидкостными дисперсиями, включающих жидкие коллоиды ферромагнетиков («магнитные» жидкости), стабилизированные суспензии ферромагнетиков в слабомагнитных жидкостях и слабомагнитных частиц в «магнитных» жидкостях, магнитожидкостные композиции для шлифовки, полировки и дефектоскопии, а также составы, сопутствующие получению всех этих материалов. Частично методика может быть

использована для сыпучих и твердых ферромагнетиков. Предметом исследования является магнитное поле и гидростатические магнитные силы в этих материалах под воздействием неоднородного намагничивающего поля.

**Гипотеза.** Проводимые исследования основываются на предположении о существовании достаточно простых связей между параметрами магнитного поля магнитоожидкостных дисперсий и действующими на погруженные в них тела силами в экспоненциально неоднородном поле (ЭН поле), с одной стороны, и параметрами кривой намагничивания и распределения феррофазы с другой стороны, которые могут составить основу методов контроля этих материалов магнито- и силовыми способами.

**Методология и методы проведенного исследования.** Исследование распределений первичного и вторичного полей и гидростатических сил осуществлялось путем аналитического и численного математического моделирования и с помощью измерений. Основу математической модели составили уравнения магнитостатики в веществе с нелинейным законом намагничивания. Аналитическое моделирование осуществлялось с помощью разложения пространственно распределенных функций в ряд Фурье. При составлении конечно-разностной модели и ее исследовании использовались методы линейной алгебры, метод быстрого преобразования Фурье. Расчет сил проводился путем интегрирования распределенных по поверхностям пластины сил магнитоожидкостного давления и магнитного скачка давления с учетом магнитного самовоздействия дисперсии. Математическое моделирование проводилось с использованием пакетов программ TurboPascal 7 и Fortran PowerStation 4.0

Для качественного и количественного подтверждения основных выводов теоретического анализа проводились экспериментальные исследования первичного поля; вторичного поля слоя (слоев) стабильных и нестабильных МЖ дисперсий; гидростатической силы, действующей на немагнитную пластину. Измерения магнитной индукции проводились с помощью преобразователей Холла, измерения гидростатических сил – методом их компенсации силами тяжести и упругими силами.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Разработаны новые экспериментальные и физико-математические модели для исследования магнитного поля слоев МЖ дисперсий и действующих на немагнитную пластину гидростатических сил под воздействием первичного поля с экспоненциальным распределением модуля напряженности.

1. Обнаружены максимумы на зависимостях напряженности вторичного поля от напряженности первичного поля и толщины слоя, обусловленные нелинейностью кривой намагничивания дисперсии.

2. Показана временная зависимость характеристик вторичного поля нестабильных МЖ дисперсий, обусловленная перераспределением феррофазы по объему образца дисперсии в стационарном первичном поле.

3. Исследовано новое механо-магнитное преобразование: близкая к линейной зависимость между параметрами вторичного поля и гидростатической силой, действующей на погруженную в магнитную жидкость немагнитную пластину.

**Практическая значимость полученных результатов.** Установленные закономерности составляют основу для разработки новых методов контроля МЖ дисперсий в ЭН поле и других магнитожидкостных устройств. В частности:

- предложен способ контроля стабильности МЖ дисперсий по временной зависимости характеристик вторичного поля и гидростатических сил;
- разработаны магнитометрические и силометрические способы определения магнитной восприимчивости в неоднородном магнитном поле;
- разработан способ определения параметров кривой намагничивания по характеристикам максимума вторичного поля;
- исследованное в работе механо-магнитное преобразование может быть использовано в силометрических устройствах различного назначения;
- разработана конструкция прибора для комплексного определения магнитных, механических и седиментационных характеристик МЖ дисперсий.

Полученные результаты могут быть использованы предприятиями химической промышленности для контроля рабочей среды магнитожидкостных устройств ( НПРУП «Актив БГУ», РУП «Гродненский завод медицинских препаратов», ОАО «НИИХИММАШ»).

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Аналитическая и конечно-разностная модели для расчета поля слоев МЖ дисперсий, намагничиваемых неоднородным полем с экспоненциальным распределением модуля напряженности.

2. Экспериментальные и теоретические зависимости напряженности вторичного поля слоя МЖ дисперсии и действующих на плоскую пластину гидростатических сил от напряженности намагничивающего поля, толщины образца дисперсии, толщины и положения пластины.

3. Магнито- и силометрический методы контроля седиментационной стабильности МЖ дисперсий в ЭН поле.

4. Магнито- и силометрические методы определения параметров кривой намагничивания МЖ дисперсий в ЭН поле.

**Личный вклад соискателя.** Результаты проведенных исследований получены автором лично или в соавторстве с научным руководителем к.ф.-м.н. А.Н. Висловичем. Формулировка цели и задач исследований, а также выбор общей методологии проведены научным руководителем к. ф.-м.н. А.Н. Висловичем.

Формулы, определяющие распределение поля в слоистой среде с линейным законом намагничивания и уравнение механо-магнитного преобразования получены А.Н. Висловичем. На их основе автором разработаны и апробированы аналитические и конечно-разностная модели для расчета напряженности поля и механо-магнитного преобразования в слоях МЖ дисперсии с нелинейным намагничиванием. Разработаны установки и проведены теоретические и экспериментальные исследования напряженности первичного поля источника; вторичного поля слоя (слоев) МЖ дисперсий; действующих на немагнитную пластину гидростатических сил. В соавторстве с к.т.н Дударе-

вым В.В. проведено теоретическое исследование распределения феррофазы магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле.

**Апробация результатов диссертации.** Материалы диссертации представлялись в качестве докладов и тезисов на следующих научных конференциях: Eighth international conference on magnetic fluid, Timisoara, Romania, 1999; 4-ый Минский Международный форум. Тепломассообмен ММФ-2000, Минск, 2000; 9-я и 10-я Международная плесская конференция по магнитным жидкостям, Плесс, Россия 2000, 2002; Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов», Минск, 2000, 2003; Ninth international conference on magnetic fluid, Bremen, Germany, 2001; Международная конференция «Новые «интеллектуальные» материалы – электро- и магниточувствительные жидкости для энергоэффективных технологий», Минск, 2001.

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертации содержатся в 19 печатных работах, в том числе 4 научных статьях, 9 докладах и 5 тезисах на Международных научно-технических конференциях. Новизна технических решений подтверждена патентом на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, в том числе 94 страницы текста, 15 страниц иллюстраций и таблиц (количество иллюстраций – 20, таблиц – 2), 9 страниц списка использованных источников из 124 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены краткая характеристика МЖ дисперсий и обзор литературных источников по их применению. В общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, изложены выносимые на защиту положения, охарактеризована научная новизна, научная и практическая значимость полученных в работе экспериментальных и теоретических результатов.

В первой главе представлены результаты разработки источника магнитного поля, компоненты вектора напряженности которого распределены по гармоническому закону, а модуль – по экспоненциальному:

$$H^{(0)} = H_a e^{-z} (i_x \sin x + i_z \cos x), \quad H^{(0)} = H_a e^{-z}, \quad (1)$$

где  $i_x, i_z$  – единичные векторы,  $x$  и  $z$  – приведенные координаты (в качестве единиц измерения для расстояния выбран размер  $\lambda/2\pi$ , связанный с пространственным периодом  $\lambda$  распределения поля),  $H_a$  – напряженность поля на поверхности источника. Такое поле в дальнейшем называется моногармоническим или экспоненциально неоднородным полем (ЭН полем).

Это поле можно создать системой вытянутых постоянных магнитов прямоугольного сечения, расположенных с чередованием направлений их намагниченности (рис.1). Технологически оптимальной является система с четырьмя направлениями. Полученная путем Фурье-разложения амплитуда основной гармоники поля оптимальной системы равна  $H_a = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} M_f (1 - e^{-l_a})$ , где  $l_a$ ,  $M_f$  – ширина и намагниченность магнитов,  $\lambda$  – расстояние между двумя ближайшими магнитами с одинаковым направлением намагниченности.

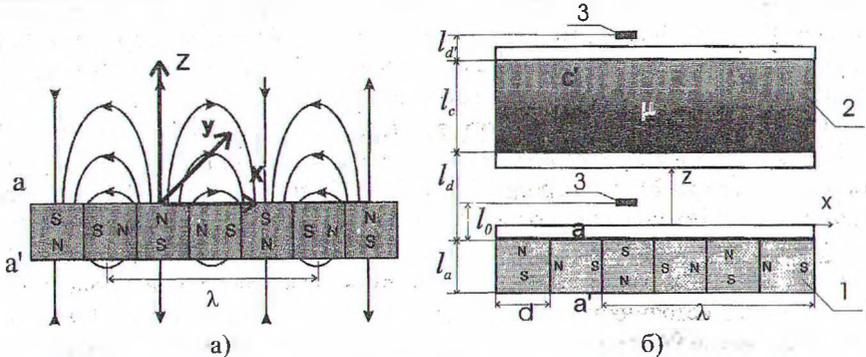


Рис. 1. а) структура линий вектора напряженности ЭН поля; б) схема экспериментальной установки по исследованию вторичного поля слоя магнетика в ЭН поле: 1 – источник поля, 2 – плоскопараллельный слой магнетика, 3 – преобразователь Холла.

Экспериментальные исследования распределения поля источника показали, что в области  $\pi/8 < z < \pi/2$  поле характеризуется хорошей степенью моногармоничности. Отклонения зависимости модуля напряженности поля от экспоненциальной вблизи поверхности источника обусловлены высшими гармониками, а на значительном удалении – конечными размерами магнитной системы.

ЭН поле удобно использовать для изучения свойств магнетиков силовыми методами. Далее в первой главе представлены результаты разработки модификации метода Фарадея с использованием этого поля. Магнитная сила  $F$ , действующая на малый эллипсоидальный образец магнетика в поле (1), выражается через средние по объему образца намагниченность  $M$  и напряженность поля  $H$ :

$$F = \mu_0 M V k H^{(o)}, \quad H = H^{(o)} - \beta M, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad (2)$$

где  $V$  – объем образца,  $\beta$  – коэффициент размагничивания.

Формулы (2) позволяют по силовметрической кривой восстановить кривую намагничивания. Преимуществом данного метода является то, что в ЭН поле имеются точки устойчивого равновесия образца, что упрощает измере-

ния при исследовании сильномагнитных материалов. Метод Фарадея и другие известные силовметрические методы не позволяют осуществлять контроль неоднородности свойств по объему образца. Для этого необходимо использовать достаточно протяженные образцы. В этом случае измерения силы можно осуществлять в комплексе с измерением напряженности создаваемого образцом поля (вторичного поля).

Затем в первой главе предложены магнито- и силовметрические методы контроля седиментационной стабильности в плоскопараллельных слоях МЖ дисперсий, намагничиваемых ЭН полем. Магнитомертрический метод заключается в измерении напряженностей поля вблизи нижней (область «отражения») и верхней (область «прохождения») поверхностей слоя (рис.1, б). При силовметрическом методе в исследуемый образец полностью погружают немагнитное (диа- или парамагнитное) тело. Контроль стабильности основан на регистрации изменений напряженностей вторичного поля слоя и действующей на немагнитное тело выталкивающей силы.

Во второй главе представлены результаты расчета вторичного поля плоскопараллельного слоя магнетика в ЭН поле на основе системы уравнений магнитостатики

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = -\nabla^2 \varphi = -\mathbf{H} \cdot \nabla \mu / \mu, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}^{(0)} - \nabla \varphi, \quad (3)$$

$$\mu H_z = \mu^- H_z^-, \quad H_x = H_x^-, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – потенциал вторичного поля. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности описывается уравнением

$$\mu = 1 + \chi_m / (1 + H / H_h), \quad \chi_m = M_s / H_h, \quad (5)$$

где  $M_s$ ,  $H_h$  – параметры кривой намагничивания.

Для слоя линейного магнетика ( $H \ll H_h$ ) гармоническое по координате  $x$  решение уравнения (3) имеет вид

$$\mathbf{H} = H_{L_i} e^{-z} (\mathbf{i}_x \sin x + \mathbf{i}_z \cos x) + H_{R_i} e^z (-\mathbf{i}_x \sin x + \mathbf{i}_z \cos x), \quad (6)$$

где  $H_{L_i}$  и  $H_{R_i}$  – амплитуды напряженности намагничивающего и индуцированного поля, постоянные в пределах слоя. Уравнения, связывающие параметры  $H_{L_i}$  и  $H_{R_i}$  при переходе через границу слоев с различными магнитными свойствами, имеют вид

$$q_i = \frac{H_{L_i}}{H_{L_i}^-} = \frac{1 - r_i}{1 + r_i s_i^- e^{-2l_i}}, \quad s_i = \frac{H_{R_i}^-}{H_{L_i}^-} = \frac{r_i + s_{i-1}^- e^{-2l_i}}{1 + r_i s_{i-1}^- e^{-2l_i}}, \quad r_i = \frac{\mu_i - \mu_{i+1}}{\mu_i + \mu_{i+1}}, \quad (7)$$

где  $l_i$  – толщина  $i$ -го слоя.

Коэффициент  $s$  характеризует связь  $H_L$  и  $H_R$  по одну сторону границы, а коэффициент  $q$  – связь  $H_L$  при переходе через границу сред с различными магнитными проницаемостями. Вторичное поле в области «отражения» ( $a, c$ ) (рис.1, б) определяется  $H_R$ , а в области «прохождения» ( $c', \infty$ ) –  $H_L$ .

В процессе экспериментов напряженность вторичного поля определяется как изменение напряженности поля  $\Delta \vec{H} = \vec{H} - \vec{H}^{(o)}$  при помещении образца. Согласно линейной теории выражения для расчета напряженности вторичного поля в области «прохождения»  $\Delta \vec{H}^{scr}$  и «отражения»  $\Delta \vec{H}^{ref}$  имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta H^{scr} &= -\Delta q H_c^{(o)} e^{z-zc'} (i_x \sin x + i_z \cos x), \\ \Delta H^{ref} &= s H_c^{(o)} e^{z-zc} (-i_x \sin x + i_z \cos x), \\ s &= \frac{r_c + r_{c'} e^{-2lc}}{1 + r_c r_{c'} e^{-2lc}}, \quad \Delta q = 1 - \frac{(1-r_c)(1+r_{c'})}{1 - r_c r_{c'} e^{-2lc}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $H_c^{(o)}$  и  $H_{c'}^{(o)} = H_c^{(o)} \exp(-l_c)$  – модули напряженности первичного поля у нижней и верхней границ слоя,  $\Delta q = 1 - q_c q_{c'}$ ,  $s = s_c$ .

На основании формул (6), (7) линейной теории разработан приближенный метод (квазилинейное приближение) расчета напряженности вторичного поля нелинейного магнетика. Возможны различные модификации квазилинейного приближения. **Однопараметрическая однослойная модель** основана на предположении, что в пределах слоя магнитная проницаемость постоянна и равна некоторому эффективному значению  $\mu_*$ , находящемуся в диапазоне изменения реальной проницаемости ( $\mu_c < \mu_* < \mu_{c'}$ ), следовательно  $r_{c'} = -r_c = (1 - \mu_*) / (1 + \mu_*)$ . С помощью данной модели по максимальному  $\mu_* = \mu_c$  и минимальному  $\mu_* = \mu_{c'}$  можно определить интервалы, в которых заключены трансформационные коэффициенты  $s$  и  $q$ . В **двухпараметрической модели** коэффициенты  $r$  для границ  $c$  и  $c'$  рассчитываются по магнитным проницаемостям у этих границ  $r_{c'} = (1 - \mu_{c'}) / (1 + \mu_{c'})$ ,  $-r_c = (1 - \mu_c) / (1 + \mu_c)$ . Более детализированный подход для учета нелинейности закона намагничивания в широких слоях состоит в условном разбиении слоя на  $N$  подслоев толщиной  $l_c/N$  (**многослойная модель**). В пределах каждого подслоя магнитную проницаемость  $\mu_*$  можно считать постоянной, равной среднему значению  $\mu_{i*} = (\mu_i + \mu_{i-1}) / 2$ , где  $i = 0, \dots, N$  – номер границы раздела. Коэффициенты трансформации рассчитываются следующим образом:

$$s = s_N, \quad q = q_0 \cdot q_1 \cdot \dots \cdot q_i \cdot \dots \cdot q_N, \quad \Delta q = 1 - q, \quad (9)$$

где  $q_0 = qc'$ ,  $q_N = qc$ .

Для оценки области применения квазилинейных приближений разработана конечно-разностная модель уравнений магнитостатики (3), (4), учитывающая все существенные факторы формирования вторичного поля нелинейного магнетика, намагничиваемого ЭН полем. Скалярный магнитный потенциал  $\phi$  вторичного поля представлен в виде суммы из  $n_x$  гармоник

$$\phi_l = \sqrt{\frac{2}{n_x}} \sum_{m=1}^{n_x-1} \phi_{m,l} \sin \frac{m\pi k}{n_x}.$$

Конечно-разностная модель задачи (рис.1, б) для равномерной сетки с шагом  $h = 1/n_x = l_1/n_{z1} = l_c/n_{z2} = l_3/n_{z3}$  имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \left( \lambda_m + \frac{2hm}{\mu} \right) \phi_{m,n_{z1}} - 2\phi_{m,n_{z1}+1} &= h^2 (F_{m,n_{z1}} - V_m) \\ \lambda_m \phi_{m,l} - \phi_{m,l-1} - \phi_{m,l+1} &= h^2 F_{m,l} \quad \text{при } l = n_{z1} + 1 \dots n_{z1} + n_{z2} - 1, \\ \left( \lambda_m + \frac{2hm}{\mu} \right) \phi_{m,n_{z1}+n_{z2}} - 2\phi_{m,n_{z1}+n_{z2}-1} &= h^2 (F_{m,n_{z1}+n_{z2}} + V_m) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где  $\lambda_m = 2 \left( 2 - \cos \frac{m\pi}{n} \right)$ ,  $F_{m,l} = \sqrt{\frac{2}{n_x}} \sum_{n=1}^{n_x-1} f_{n,l} \sin \frac{m\pi n}{n_x}$ ,  $\mu_{k,l} = \chi_m / (H_{k,l} + 1) + 1$ ,

$V_m = \frac{2\mu-1}{h\mu} \phi_{k,l}^{(o)}$  для  $m=1$  и  $V_m=0$  для  $m \neq 1$ ,

$$f_{k,l} = \left( \left( -H_x^{(o)} + \frac{\Phi_{k+1,l}^{(2)} - \Phi_{k-1,l}^{(2)}}{2h} \right) \mu_{k,x}^{(2)} + \left( -H_z^{(o)} + \frac{\Phi_{k,l+1}^{(2)} - \Phi_{k,l-1}^{(2)}}{2h} \right) \mu_{k,z}^{(2)} \right) / \mu^{(2)}. \quad (11)$$

Система (10) решается методом последовательных итераций. Практическим путем определено, что после седьмой итерации уточнение напряженности поля не превышает 1%. Величина третьей гармоники магнитного потенциала поля не превышает 10% от величины первой гармоники. Третьи гармоники стремятся к нулю в слабых и сильных полях.

Приняв в (10) объемный источник равным нулю  $f_{k,l}=0$  получим конечно-разностный аналог однослойной квазилинейной модели. Для формулировки многослойной конечно-разностной модели в объемный источник  $h^2 f$  (11)

следует ввести аппроксимацию  $\mu_{k,x} \approx 0$  и  $\mu_{k,z} / \mu \approx \frac{2}{h} (\mu^+ - \mu^-) / (\mu^+ + \mu^-)$ .

Погрешность квазилинейного многослойного приближения в области «отражения» не превышает 1%. Квазилинейное приближение удобно в применении, поскольку обеспечивает достаточную точность при значительно большей (чем у конечно-разностной модели) скорости расчета.

В третьей главе представлены результаты измерений максимальной нормальной составляющей напряженности вторичного поля двух образцов (стабильного и нестабильного) МЖ дисперсии в ЭН поле. На источник поля 1 помещали кювету 2 с МЖ дисперсией (рис.1, б). Изменение напряженности магнитного поля измеряли преобразователями Холла 3. Наблюдается увеличение результирующей напряженности поля в области «отражения» и уменьшение в области «прохождения». Поэтому разности  $\Delta H^{ref} = H_d - H_d^{(o)}$  и  $\Delta H^{scr} = H_d^{(o)} - H_d'$  положительны. В качестве стабильной МЖ дисперсии использовалась коллоидная взвесь частиц магнетита в трансформаторном масле с характеристическими параметрами:  $M_s=54,44$  кА/м;  $H_h=17,49$  кА/м. Характеристики индуцированного образцом поля представлены на рис.2.

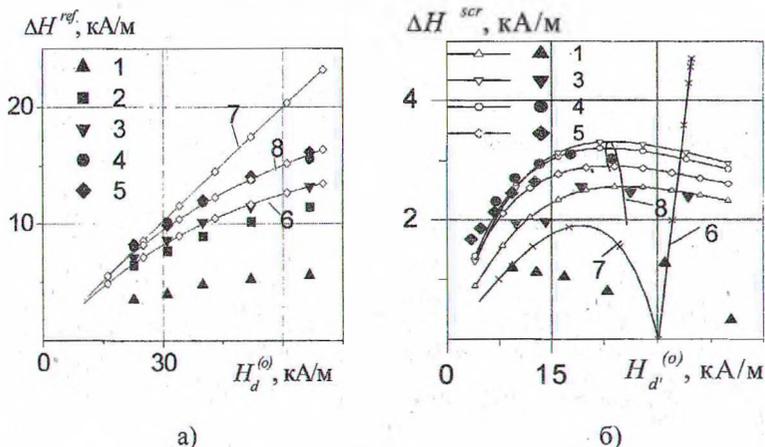


Рис. 2. Зависимость максимальной нормальной составляющей напряженности вторичного поля слоя в области «отражения» (а) и «прохождения» (б) от модуля напряженности первичного поля для различных толщин слоя: 1 – 3.3 мм, 2 – 8.3 мм, 3 – 13 мм, 4 – 16.7 мм, 5 – 19.7 мм. Темными значками обозначены результаты измерений, светлыми той же формы – результаты расчета: 6 и 7 – расчет по однослойной модели при  $\mu^* = \mu_c$  и  $\mu^* = \mu_{c'}$ , соответственно; 8 – расчет по многослойной модели.

Из рисунков видно, что экспериментальные данные находятся между предельными зависимостями 6 и 7 однослойной модели (рис.2, а). Расчет по многослойной модели 8 позволяет существенно улучшить описание экспериментальных данных 5. На экспериментальных зависимостях  $\Delta H^{scr}$  наблюдаются условные максимумы при изменении напряженности первичного поля и толщины намагничивающегося слоя (рис.2, б). В области «отражения» максимум не наблюдается.

При помещении в ЭН поле нестабильной дисперсии наблюдается временная зависимость характеристик вторичного поля, обусловленная перерас-

пределением феррофазы по объему образца. Количественной мерой неоднородности дисперсии является изменение  $\Delta H^{sep} = H_d - H_{d_0}$  (сепарационно-магнитный эффект), где  $H_{d_0}$  – напряженность магнитного поля в момент установки кюветы. Напряженность вторичного поля в любой момент времени можно представить в виде суммы начального изменения и изменения, обусловленного сепарацией  $\Delta H^{ref} = \Delta H_0^{ref} + \Delta H^{sep}$ .

Для изучения была выбрана первичная (не подверженная сепарации) дисперсия магнетита в турбинном масле, получаемая на первой стадии синтеза магнитной жидкости. Магнитные характеристики механически перемешанной дисперсии:  $M_S = 75$  кА/м;  $H_h = 33$  кА/м; толщина слоя  $l_c = 19,7$  мм. На рис.3, а представлены результаты трёх однотипных экспериментов. Максимальное достигнутое (через 18 часов) изменение напряженности в области «отражения» составило  $\Delta H_{max}^{sep} = 9,9$  кА/м.

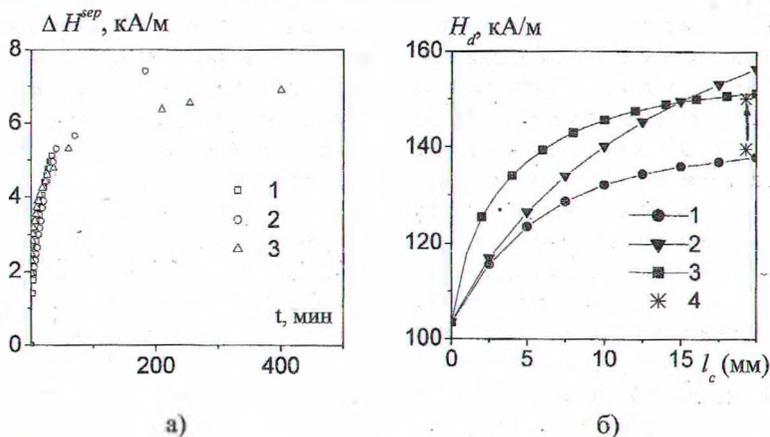


Рис.3. а) экспериментальные зависимости максимальной нормальной составляющей напряженности вторичного поля от времени; б) расчетные зависимости нормальной составляющей напряженности результирующего поля от толщины слоя для: 1 – однородного ферроколлоида, 2 – ферроколлоида с бoльцмановской неоднородностью феррофазы, 3 – МЖ дисперсии с двухслойной неоднородностью. Звёздочками отмечены экспериментальные значения.

Расчет поля нестабильной МЖ дисперсии был проведен для простейших типов неоднородного распределения феррофазы в дисперсии – бoльцмановской и двухслойной. Бoльцмановское распределение частиц ферроколлоида, дисперсную фазу которого образуют монодисперсные невзаимодействующие частицы, в ЭН поле описывается зависимостью

$$n(z) = n_c \frac{sh(\xi_c u)}{u \cdot sh \xi_c}, \quad u = \frac{\xi}{\xi_c} = \exp(-z + z_c) \quad (12)$$

где  $n_c$  – концентрация феррофазы на нижней границе слоя дисперсии,  $\xi$  – ланжевеновский аргумент.

Распределение (12) позволяет получить выражение для магнитной восприимчивости, как функции вертикальной координаты

$$\chi(z) = \overline{M}_s f(\xi_c, l_c) \frac{sh(\xi_c u)}{u} \frac{L}{H_z^{(o)}}, \quad f(\xi_c, l_c) = l \left( \int_{u_c}^1 \frac{sh(u \xi_c)}{u^2} du \right)^{-1} \quad (13)$$

При двухслойной неоднородности МЖ дисперсия разделяется на два плоскопараллельных слоя – жидкость и пасту. Предполагается, что в пределах каждого слоя магнитные свойства постоянны и описываются дробно-линейной зависимостью (5).

На рис.3, б представлены расчётные зависимости напряженности поля в области «отражения» от толщины слоя, полученные в квазилинейном многослойном приближении. Как видно, сепарационно-магнитный эффект в слабых полях сильнее выражен для двухслойной неоднородности, а в сильных – для больцмановской. Экспериментальным данным лучше соответствует двухслойная неоднородность. Таким образом, магнитометрические измерения позволяют контролировать процессы разделения фаз МЖ дисперсии. Вместе с тем следует отметить, что для более определенного установления типа неоднородности необходимо проводить магнитометрические измерения для слоя переменной толщины. Изменение толщины слоя можно осуществлять путем перемещения немагнитного тела с плоской поверхностью, погруженного в МЖ дисперсию. При этом появляется дополнительная возможность проводить контроль дисперсии по измерению действующей на тело гидростатической силы.

В четвертой главе приведены результаты исследования действующей на немагнитную пластину гидростатической силы в ЭН поле (рис.4). Параметры кривой намагничивания МЖ дисперсии:  $M_s = 35,40$  кА/м,  $H_h = 17,12$  кА/м. Уровень жидкости ( $l_c = l + l_b + l_1 = 18,6$  мм) при погружении пластины поддерживается постоянным. На рис.5, а представлены результаты измерений и расчета приведенной (приходящейся на единицу площади пластины) гидростатической силы. Расчет поля проведен двумя методами – в квазилинейном приближении и по конечно-разностной модели.

Приведенная сила равна алгебраической сумме средних значений нормальных напряжений в жидкости вблизи поверхностей  $b$  и  $b'$ :

$$\langle \sigma_b \rangle = \langle \sigma_{zb'} \rangle - \langle \sigma_{zb} \rangle, \quad (14)$$

$$\text{где } \sigma_z = p_m(x) + \frac{\mu_0 M_z^2}{2}, \quad p_m(x) = \mu_0 M_s \left( H - H_h \ln \left( 1 + \frac{H}{H_h} \right) \right), \quad M_z = \frac{M_s}{2} \frac{H_z}{H_h + H(x)}$$

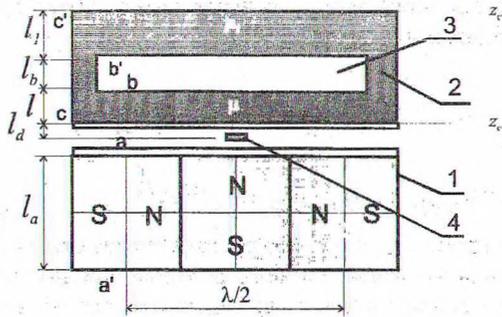


Рис. 4. Схема экспериментальной установки по исследованию гидростатической силы в ЭН поле: 1 – источник ЭН поля, 2 – катушка, 3 – немагнитная пластина, 4 – преобразователь Холла.

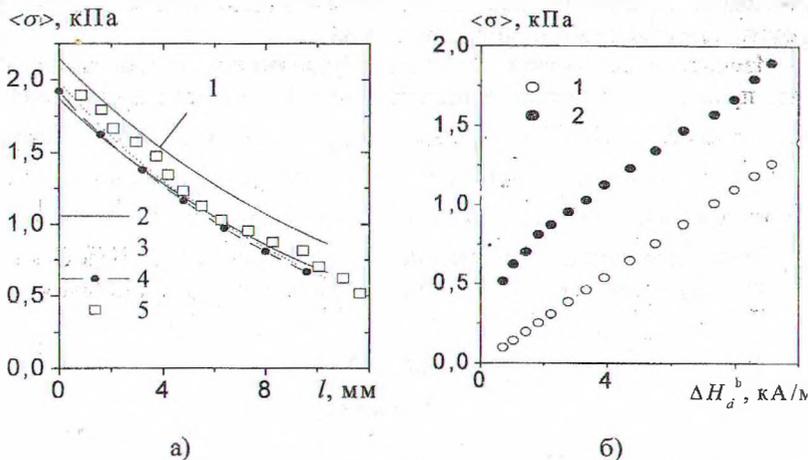


Рис.5. а) зависимости приведенной силы от расстояния пластины до источника: 1 – безындукционное приближение (15); 2 – однослойное квазилинейное приближение (16); 3 – многослойное квазилинейное приближение; 4 – конечно-разностная модель; 5 – эксперимент; б) зависимости приведенной силы от разности напряженностей вторичного поля в отсутствии и присутствии пластины: 1 – эксперимент, 2 – расчет по (17).

При использовании в формуле (14) первичного поля получим выражение для силы в безындукционном приближении

$$\frac{\sigma}{\mu_0 M_s H_h} = (\zeta_b - \zeta_{b'}) \left( 1 + \frac{\chi_m}{4} \frac{\zeta_b + \zeta_{b'} + 2\zeta_b \zeta_{b'}}{(1 + \zeta_b)^2 (1 + \zeta_{b'})^2} \right) - \ln \frac{1 + \zeta_b}{1 + \zeta_{b'}}, \quad (15)$$

где  $\zeta_i = H_i^{(0)} / H_h$ ,  $i = b, b'$ .

При учете вторичного поля, рассчитанного в рамках квазилинейного однослойного приближения, формула (14) примет вид

$$\sigma = \mu_0 \left( \mu_{b'} H_{L_{b'}}^2 e^{-2l_1} r_{c'} - \mu_b H_{L_b}^2 s_b \right), \quad (16)$$

где  $H_{L_{b'}} = H_{L_b} e^{-l_b} q_b q_{b'}$ ,  $H_{L_b} = q_c H_a e^{-(l_d + l)}$ .

Так же был проведен расчет гидростатической силы с учетом вторичного поля рассчитанного в квазилинейном многослойном приближении и по конечно-разностной модели (рис.5, а). Как видно, результаты расчета в целом соответствуют экспериментальным данным. Ширина полосы, которую образуют графики силы, рассчитанные без учета и с учетом вторичного поля, характеризует вклад механизма самовоздействия жидкости в силу. Кривые, полученные на основе квазилинейных приближений, незначительно расходятся с результатами конечно-разностной модели.

Изменение положения пластины, обусловленное изменением внешней силы, приводит к изменению, регистрируемой преобразователем, напряженности вторичного поля  $\Delta H_d^b = \Delta H_{d0} - \Delta H_d$  (механо-магнитное преобразование). На рис.5, б представлены результаты измерений и расчета по конечно разностной модели приведенной силы от напряженности  $\Delta H_d^b$ .

Приведенная сила и напряженность вторичного поля в области «отражения» связаны соотношением, во многих случаях близким к линейному:

$$\sigma_b = \frac{\mu_0 H_d^{(o)} \Delta H_d^b}{1 + \varepsilon_c + \varepsilon_a}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_a = -\frac{\mu_0 H_d^{(o)} \Delta H_d^{b(n)}}{\sigma^b} = -\frac{\mu_0 H_d^{(o)} \Delta H_d^b - \Delta \sigma^a}{\sigma^b}$ ,  $\varepsilon_c = -\frac{\Delta \sigma^c}{\sigma^b}$  - безразмерные

поправочные коэффициенты, нарушающие линейную зависимость, которые связаны с вкладами высших гармоник во вторичное поле в области «отражения» и вторичного поля в действующую на дно кюветы гидростатическую силу (магнитный вес жидкости), соответственно. Путем численного исследования на основе конечно-разностной модели сделан вывод, что в умеренных и сильных полях их значение менее 0,12.

Дегализированный контроль МЖ дисперсий можно осуществлять путем определения параметров кривой намагничивания, которые связаны с концентрацией дисперсной фазы, размерами и уровнем диполь-дипольного взаимодействия частиц.

В пятой главе представлены результаты разработки магнито- и силометрических методов определения параметров кривой намагничивания МЖ дисперсий в ЭН поле. Если во всем объеме образца выполняется линейный закон намагничивания, то единственным параметром, определяющим маг-

нитные свойства, является магнитная восприимчивость, которую можно рассчитать по одной из следующих формул

$$\chi = \frac{2\Delta q}{s - \Delta q}, \quad \chi = \frac{2\sigma}{\mu_0 H_{d'}^2} - 1 + \sqrt{\frac{2\sigma}{\mu_0 H_{d'}^2} - 1},$$

где  $s = \Delta H^{ref} / H_d^{(o)} e^{2l_d}$ ,  $\Delta q = \Delta H^{scr} / H_{d'}^{(o)}$ . Здесь используются напряженности первичного поля в тех же точках, в которых измеряются напряженности вторичного поля.

Параметры кривой намагничивания удобно определять по характеристикам (для которых численным методом с использованием конечно-разностной модели разработана номограмма, а также интерполяционные формулы) обусловленного нелинейностью закона намагничивания абсолютного максимума напряженности вторичного поля в области «прохождения». Существенным упрощающим результатом является то, что оптимальная толщина слоя слабо зависит от параметров кривой намагничивания и определяется пространственным периодом первичного поля. Формулы для определения параметров кривой намагничивания для разработанного источника ЭН поля ( $l_c \approx \lambda / 8 = 10 \text{ мм}$ ) имеют вид

$$M_s = 3,98\Delta H^{ref} - 6,01\Delta H_m^{scr}, \quad H_h = \frac{M_s}{2} \left( \sqrt{\frac{0,116\Delta H^{ref} - 0,1231\Delta H_m^{scr}}{0,2648\Delta H_m^{scr} - 0,0089\Delta H^{ref}} - 1} \right),$$

где  $\Delta H_m^{scr}$  и  $\Delta H^{ref}$  - абсолютный максимум напряженности вторичного поля в области «прохождения» и соответствующее ему значение напряженности вторичного поля в области «отражения».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование распределения напряженности поля плоской системы постоянных магнитов с периодическим распределением ориентации намагниченности. Определена область, в которой модуль напряженности поля при удалении от поверхности системы убывает по экспоненциальному закону (ЭН поле), а нормальная и тангенциальная составляющие изменяются вдоль поверхности системы по гармоническому закону [3, 16].

2. Предложена модификация метода Фарадея для определения намагниченности малых образцов магнетиков, а также новые магнито- и силовые методы контроля седиментационной устойчивости и параметров кривой намагничивания плоских слоев дисперсий под воздействием ЭН поля [6, 19].

3. Разработано несколько разновидностей приближенного метода расчета поля плоскопараллельных слоев нелинейных магнетиков, намагничиваемых ЭН полем, в которых нелинейность кривой намагничивания учитывается путем модификации параметров распределения поля в линейнонамагничивающейся среде (квазилинейные приближения), а также конечно-разностная модель, учитывающая все существенные факторы формирования магнитостатического поля. Проведены расчеты по обоснованию области применения квазилинейного приближения. Квазилинейные приближения обеспечивают высокую скорость расчета зависимостей характеристик распределения поля от параметров, а конечно-разностная модель позволяет уточнить эти зависимости [3, 4, 8, 14, 16].

4. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование поля плоскопараллельного слоя стабильной и нестабильной МЖ дисперсии, намагничиваемой ЭН полем. Для стабильной дисперсии получены зависимости напряженности вторичного поля в области между слоем и источником и в области за слоем от толщины слоя и напряженности первичного поля. На этих зависимостях в области за слоем обнаружены обусловленные нелинейностью кривой намагничивания максимумы. Оптимальная толщина слоя слабо зависит от параметров кривой намагничивания и определяется пространственным периодом первичного поля  $l_c \approx \lambda/8 = 10$  мм. Для нестабильной дисперсии показана временная зависимость характеристик вторичного поля, обусловленная перераспределением феррофазы по объему образца (магнито-сепарационный эффект) [3, 8, 12-14, 16, 17].

5. Проведено экспериментальное исследование силы, действующей на погруженную в МЖ дисперсию немагнитную пластину. Получены приближенные формулы для расчета силы. Формула, в которой используется внешнее поле (безындукционное приближение), дает высшую оценку для силы. Формула, в которой внешнее поле используется для расчета трансформационных параметров, дает более низкую оценку. Исследована связь между силой и параметрами вторичного поля (механо-магнитное преобразование при плавании немагнитного тела в магнитной жидкости). В умеренных и сильных полях она близка к линейной. В слабых полях при высокой начальной восприимчивости может наблюдаться существенная нелинейность [5, 9-11, 15].

6. Разработаны магнитометрические и силометрические способы определения магнитной восприимчивости, способ определения параметров кривой намагничивания по характеристикам максимума вторичного поля. Разработана конструкция прибора для комплексного контроля магнитожидкостных дисперсий по магнитным и гидромеханическим характеристикам [1, 2, 7, 18, 20, 21]. Получен патент на полезную модель устройства для контроля седиментационной стабильности магнитожидкостных дисперсий в экспоненциально неоднородном поле. Разработанные способы контроля МЖ дисперсий внедрены в производство НПРУП «Актив БГУ», РУП «Гродненский завод медицинских препаратов», ОАО «НИИХИММАШ» (г. Санкт-Петербург).

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ  
ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. V.Bashtovoi, A.Reks, L.Suloeva, A.Sukhotskii, A.Nethe, H.D.Stahlmann, N.Buske, P.Killat. Study of pondermotive interaction of magnetic field sources in magnetic fluid // Eighth international conference on magnetic fluids. — Romania, Timisoara, 1999. — P. 331—332.
2. V.Bashtovoi, A.Reks, L.Suloeva, A.Sukhotskii, A.Nethe, H.D.Stahlmann N.Buske P.Killat Study of pondermotive interaction of magnetic field sources in magnetic fluid // J. of Magnetism and magnetic materials. — Vol. 201. — 1999. — P.332—334.
3. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Отражение пространственной гармоника магнитостатического поля от намагничивающегося слоя // Труды БГТУ, Вып. VII. Физ.-мат. науки. — Минск, 1999. — С.78—91.
4. Баштовой В.Г., Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Трансформация пространственной гармоника температурного поля в слоистой среде // Теплообмен ММФ — 2000. — Минск, 2000. —Т.10 — С.211 — 217.
5. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Взаимодействие плоских источников, погруженных в магнитную жидкость // Девятая Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям. — Плес, 2000. — С.70—75.
6. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Исследование кривой намагничивания ферромагнетиков силометрическим методом // Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». БГТУ. — Минск, 2000. — С. 246—249.
7. Сухоцкий А.Б. Определение магнитных характеристик магнетиков путем регистрации силы Ампера // Международная научно—техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». БГТУ. — Минск, 2000. — С. 243—245.
8. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Прохождение пространственной гармоника магнитостатического поля через слой магнитной жидкости // Труды БГТУ. Вып. IX. Физ.-мат. науки. — Минск, 2001. — С.78—91.
9. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силы, действующие на пластину в магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // МЖГ. — 2001. — №6. — С. 3—14.
10. Vislovich A.N., Sukhotskii A.B. Forces exerted on a plate in a magnetic fluid located in a magnetic field with exponential inhomogeneity // Fluid Dinamics. — Vol.36, No.6, 2001. — P.855—865.
11. Vislovich A.N., Suhotsky A.B. Levitation of a parallel plate body in a flat magnetic reservoir // Book of Abstracts. Ninth international conference on magnetic fluid. — Bremen, Germane, 2001. — P.460—461.
12. Вислович А.Н., Дударев В.В., Сухоцкий А.Б. Исследование неоднородности распределения концентрации феррофазы в магнитных жидкостях методом отражения пространственной гармоника магнитостатического поля // Международная конференция и школа-семинар «Новые «интел-

- лектуальные» материалы – электро- и магниточувствительные жидкости и их применение для энергоэффективных технологий». — Минск, 2001. — С. 12—22.
13. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Неустойчивость поверхности магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // Международная конференция и школа-семинар «Новые «интеллектуальные» материалы – электро- и магниточувствительные жидкости и их применение для энергоэффективных технологий». — Минск, 2001. — С. 41—49.
  14. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Аналитические и численные модели трансформации магнитостатического поля в слое нелинейномагнитизирующегося магнетика // Труды БГТУ. Вып.Х. Физ.-мат. науки и информатика. — Минск, 2002. — С. 78—85.
  15. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силы, действующие на пластину в магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // Десятая Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям. — Плес, 2002. — С.206—214.
  16. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Трансформация пространственной гармоника магнитостатического поля в слое магнитной жидкости // ИФЖ. — Т.75, №5. — 2002. — С.88—95.
  17. Вислович А.Н., Дударев В.В., Сухоцкий А.Б. Исследование стабильности ферроколлоидов сепарационно-магнитным методом // Труды БГТУ. Вып.Х. Химия и технология неорганических веществ. — Минск, 2002. — С. 139—145.
  18. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силовметрический способ определения магнитной восприимчивости жидкостей // Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». БГТУ. — Минск, 2003. — С. 216—219.
  19. Патент на полезную модель. МПК G01R 33/00. Седиментометр / Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. — № 1386; Заявл. 14.10.2003; Оpubл. 30.6.2004 // Официальный бюллетень / Нац. центр интеллектуальной собственности.— 2004.— № 2(41).

Сухоцкі Альберт Барысавіч

**Распрацоўка метадаў кантролю магнітавадкасных дысперсій  
пад уздзеяннем неаднароднага магнітнага поля**

*Ключавыя словы:* магнітавадкасная дысперсія (МВ дысперсія), магнітаметрычныя і сіламетрычныя метады кантролю, седзіментацыйная ўстойлівасць, магніта-сепарацыйны эфект, механа-магнітнае пераўтварэнне.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца магнітавадкасныя дысперсіі, уключаючы вадкасныя калоіды ферамагнетыкаў («магнітныя» вадкасці), стабілізаваныя суспензіі ферамагнетыкаў у слабамагнітных вадкасцях і слабамагнітных часціц у «магнітных» вадкасцях, магнітавадкасныя кампазіцыі для шліфоўкі, паліроўкі і дэфектаскапіі, а таксама саставы, якія спадарожнічаюць атрымання ўсіх гэтых матэрыялаў. Прадметам даследавання з'яўляецца магнітнае поле і гідрастатычныя магнітныя сілы ў гэтых матэрыялах пад уздзеяннем неаднароднага намагнічваючага поля.

Мэта дысертацыйнай работы – устанавленне заканамернасцей размеркавання магнітнага поля МВ дысперсій і сіл, якія ўздзейнічаюць на паверхні кантактуемых з імі цвёрдых цел у магнітным полі з экспаненцыяльнай неаднароднасцю модуля напружанасці і распрацоўка на іх аснове магніта-сіламетрычных метадаў кантролю гэтых матэрыялаў.

У дысертацыйнай рабоце паказана часавая залежнасць характарыстык другаснага поля, што абумоўлена пераразмеркаваннем ферафазы па аб'ёму ўзору ў стацыянарным неаднародным першасным полі, прапанаваны метады кантролю стабільнасці МВ дысперсій па часовай залежнасці характарыстык другаснага поля і гідрастатычных сіл.

Выяўлены максімумы на залежнасцях напружанасці другаснага поля ад напружанасці першаснага поля і таўшчыні слоя, якія абумоўлены нелінейнасцю крывой намагнічвання дысперсіі.

Даследавана новае механа-магнітнае пераўтварэнне: блізкая да лінейнай залежнасць паміж параметрамі другаснага поля і гідрастатычнай сілай, якая ўздзейнічае на пагружаную ў МВ дысперсію немагнітную пласціну.

Распрацаваны магнітаметрычныя і сіламетрычныя спосабы вызначэння магнітнай успрымальнасці. Распрацаваны спосаб вызначэння параметраў крывой намагнічвання па характарыстыках максімуму напружанасці другаснага поля. Распрацавана канструкцыя прыбора для комплекснага кантролю магнітавадкасных дысперсій па магнітных і гідрамеханічных характарыстыках.

## РЕЗЮМЕ

Сухоцкий Альберт Борисович

**Разработка методов контроля магнитожидкостных дисперсий  
под воздействием неоднородного магнитного поля**

*Ключевые слова:* магнитожидкостная дисперсия (МЖ дисперсия), магнитометрические и силометрические методы контроля, седиментационная устойчивость, магнито-сепарационный эффект, механо-магнитное преобразование.

Объектом исследования являются магнитожидкостные дисперсии, включающие жидкие коллоиды ферромагнетиков («магнитные» жидкости), стабилизированные суспензии ферромагнетиков в слабомагнитных жидкостях и слабомагнитных частиц в «магнитных» жидкостях, магнитожидкостные композиции для шлифовки, полировки и дефектоскопии, а также составы, сопутствующие получению всех этих материалов. Предметом исследования является магнитное поле и гидростатические магнитные силы в этих материалах под воздействием неоднородного намагничивающего поля.

Цель диссертационной работы – установление закономерностей распределения магнитного поля МЖ дисперсий и сил, действующих на поверхности контактирующих с ними твердых тел, в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью модуля напряженности и разработка на их основе магнито- и силометрических методов контроля этих материалов.

В диссертационной работе показана временная зависимость характеристик вторичного поля, обусловленная перераспределением феррофазы по объему образца в стационарном неоднородном первичном поле, предложены методы контроля стабильности МЖ дисперсий по временной зависимости характеристик вторичного поля и гидростатических сил.

Обнаружены максимумы на зависимостях напряженности вторичного поля от напряженности первичного поля и толщины слоя, обусловленные нелинейностью кривой намагничивания дисперсии.

Исследовано новое механо-магнитное преобразование: близкая к линейной зависимость между параметрами вторичного поля и гидростатической силой, действующей на погруженную в МЖ дисперсию немагнитную пластину.

Разработаны магнитометрические и силометрические способы определения магнитной восприимчивости. Разработан способ определения параметров кривой намагничивания по характеристикам максимума напряженности вторичного поля. Разработана конструкция прибора для комплексного контроля магнитожидкостных дисперсий по магнитным и гидромеханическим характеристикам.

## SUMMARY

Sukhotskii Albert Borisovich

**Development of methods of testing magnetic fluid dispersions  
under the effect of a nonuniform magnetic field**

*Keywords:* magnetic fluid dispersion (MF dispersion), force and magnetic metric methods of testing, sedimentation stability, magnetic-separator effect, mechanical-magnetic transformation.

The objects of an investigation are magnetic fluid dispersions, including fluid colloids of ferromagnetics ("magnetic" fluids), stabilized suspensions of ferromagnetics in low magnetic fluids and low magnetic of particles in "magnetic" fluids, magnetic fluid composition for an abrasion, polishing and flaw detection, and also compositions which accompany obtaining of all these materials. The subject of research is the magnetic field and hydrostatic magnetic forces in these materials under effect of the nonuniform magnetic field.

The aim of the thesis is the stating of regularities of distribution of a magnetic field MF dispersions and forces acting on a surface of solids, contacting with them, in the magnetic field with exponential nonuniformity of the intensity module and also the development on their basis magnetic and metric methods of testing of these materials.

The temporary dependence of secondary field characteristics, which is stipulated by redistribution ferrophase on volume of a sample in the stationary nonuniform primary field, is shown in the thesis. There are also methods of testing of stability MF dispersions on temporary dependence of secondary field and hydrostatic forces characteristics.

The maximums on dependences of the secondary field intensity on the intensity of a primary field and width of the layer, which are stipulated by nonlinearity of the curve of magnetization of the dispersion, are founded.

The new mechanical-magnetic transformation is investigated: close to linear dependence between parameters of a secondary field and a hydrostatic force acting on nonmagnetic plate immersed in MF dispersion.

Magnetic and metric methods of determination of a magnetic susceptibility are developed. The method of determination of magnetization curve parameters of on maximum characteristics of secondary field intensity is done. The apparatus for complex control of magnetic fluid dispersions on magnetic and hydromechanical characteristics is worked out.

Сухоцкий Альберт Борисович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ  
ДИСПЕРСИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

06.05.04  
Подписано в печать 24.02.04. Формат 60 × 84  $\frac{1}{16}$ . Печать офсетная.

Усл.печ. л. 1,4. ~~Усл.кр. оф. 1,4~~ Уч.-изд. л. 1,2.

Тираж 70 экз. Заказ ~~100~~.

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».  
220050, Минск, Свердлова, 13а. Лицензия ЛВ №276 от 15.04.03.

Отпечатано на ротапринте Белорусского государственного  
технологического университета.  
220050, Минск, Свердлова, 13.