

На правах рукописи

БЛИНОВ Вениамин Николаевич

**Топология фазовых диаграмм ферромагнитных
коллоидов с дальнедействующими
взаимодействиями**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре дифференциальной геометрии и приложений Механико–математического факультета ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Голо Войслав Любомирович.

Официальные оппоненты: Кац Ефим Иосифович,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (ФГБУН «Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау» РАН);

Дмитриенко Владимир Евгеньевич,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (ФГБУН «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» РАН).

Ведущая организация: ФГБУН «Институт химической физики им. Н.Н. Семенова» Российской академии наук.

Защита состоится «_____» _____ 2014 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.114.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, расположенном по адресу: 119333, г. Москва, Ленинский пр-т, д.59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (www.crys.ras.ru) ИК РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Каневский В.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В последние годы появляется всё большее число веществ и материалов, не встречающихся в природе. Это объясняется, прежде всего, желанием изготовить субстанцию с наперёд заданными свойствами, необходимыми в тех или иных приложениях. Одним из простейших примеров являются материалы, способные восстанавливаться после небольших физических повреждений, используемые сегодня при изготовлении корпусов мобильных телефонов. Другим примером являются коллоидные кристаллы [1] и другие материалы, в которых мезоскопический порядок возникает вследствие изменения физических условий на макромасштабах (например, при приложении магнитного поля [2]).

Предметом нашего исследования является другая синтетическая система, не встречающаяся в природе, – *ферромагнитные жидкости* (ФМЖ), искусственные коллоидные системы, которые, благодаря своим необычным физическим свойствам, нашли ряд важных технологических применений (например, в уплотняющих устройствах или в качестве носителей лекарственных препаратов). Ферромагнитные жидкости состоят из ферромагнитных частиц (обычно магнетит, кобальт или железо) размером порядка 10 нм, помещённых в органический растворитель или воду. Размер частиц может варьироваться, но должны выполняться два условия: (а) частицы должны быть однодоменными магнитами; (б) частицы достаточно малы и потому подвержены броуновскому движению. В коллоид также добавляют вещества, препятствующие слипанию магнитных частиц (например, олеиновую или лимонную кислоту, гидроксид тетраметиламмония). Объёмная доля твёрдых частиц составляет порядка 5%, растворителя 85%, ПАВ порядка 10%.

Системы такого типа начали изучать во второй половине XX века (S.Pappell, 1965, [3, 4]), и они незамедлительно заинтересовали исследователей своими необычными физическими свойствами, сочетающими в себе свойства жидкостей и магнетиков. Сегодня такие системы продолжают находить повсеместные применения, и можно предположить, что они будут востребованы и в будущем. В частности, их можно использовать для экспериментального анализа структуры магнитных полей (например, внутри нетривиальных обмоток с током). Однако для полноценного применения указанных систем на практике необходимо провести исследование их физи-

ческих свойств, в том числе и теоретическое. Понимание механизмов, происходящих в системе в результате внешних воздействий будет способствовать расширению круга возможных приложений таких систем.

Цель работы Целью работы является исследование мезоскопической структуры моделей ферромагнитных жидкостей. Основным методом исследования является математическое моделирование: модифицированный алгоритм Монте-Карло. В качестве модели выбрана модель дипольных сфер.

Можно выделить два основных этапа работы. Первым этапом является написание программы моделирования статистического ансамбля Гиббса дипольных сферических частиц с поддержкой возможности проведения вычислений в параллельном режиме на многоядерных вычислительных комплексах. Вторым этапом является проведение вычислений и анализ полученных результатов.

Задачи исследования

- Провести исследование мезоскопической структуры фаз моделей дипольных сфер на основании данных моделирования.
- Классифицировать наблюдаемые в моделировании фазы модели Штокмайера;
- Установить топологические свойства фазовой диаграммы модели Штокмайера;

Методы исследования Основным методом исследования является компьютерное моделирование модели Штокмайера методом Монте-Карло. Для вычисления и анализ результатов использовалось программное обеспечение, написанное автором.

Научная новизна. В работе развит новый метод исследования моделей дипольных сфер, основанный на особенностях мезоскопической структуры низкотемпературных фаз моделей. Введённый автором параметр описывает степень упорядоченности дипольных моментов частиц на мезомасштабах. Для изучения моделей дипольных сфер данный подход ранее не применялся и представляет собой новый метод, который позволил получить ряд новых результатов.

Помимо идеи о наличии локального порядка автор использует написанную им программу моделирования, реализующую усовершенствованный методами replica exchange и отжига алгоритм Метрополиса. Параллельная реализация программы позволила использовать для вычисления мощную технику, и провести моделирования значительного числа частиц (5000 - 10000). Большинство численных результатов для

моделей дипольных сфер основано на моделировании меньшего числа частиц (обычно порядка 256-512). Указанное сочетание современных алгоритмов и вычислительных средств также не применялось ранее для моделирования моделей ферромагнитных жидкостей.

Применённая методика моделирования позволила впервые построить фазовую диаграмму жидкости Штокмайера для некоторых значений физических параметров, а также изучить её топологические свойства в более общем случае.

Кроме того, в моделях дипольных сфер была впервые численно найдена колончатая фаза.

Научная и практическая значимость. Полученные результаты представляют собой теоретическое описание фазовых свойств ферромагнитных жидкостей в экспериментально допустимых интервалах значений физических параметров. При сопоставлении с экспериментальными данными можно оценить значения характерных энергий диполь-дипольных и леннард-джонсовских взаимодействий, и, как следствие, получить более подробную информацию о фазовых свойствах экспериментально получаемых ферромагнитных коллоидных систем. Кроме того, была указана область значений физических параметров, в которой, согласно нашим оценкам, может наблюдаться колончатая фаза, о существовании которой ранее высказывались лишь гипотезы. Полученные результаты представляют интерес для планирования и анализа экспериментов с ферромагнитными жидкостями.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференции «Дни Ландау'13», ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, 24 – 26 июня 2013;

семинаре группы Prof. Dr. Gerhard Gompper, Forschungszentrum Juelich 2012 г.;

семинаре кафедры дифференциальной геометрии и приложений механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (руководитель академик А.Т. Фоменко, 2011 г.);

семинаре “Oberseminar Differentialgeometrie” университетов Бохума и Дортмунда, Германия (руководители Prof. Dr. Uwe Abresch, Prof. Dr. Gerhard Knieper, Prof. Dr. Lorenz Schwachhoefer, Prof. Dr. Karl Friedrich Siburg, 2012 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 3 научные работы, список которых приведён в конце реферата.

Личный вклад автора. Постановка задачи исследования мезоскопической структуры модели Штокмайера была выполнена совместно с научным руководителем. Автором выполнено проектирование и написание программного обеспечения для проведения моделирования, проведены расчёты и анализ полученных результатов. Идея о параметре локального ориентационного порядка также принадлежит автору.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Метод исследований, основанный на анализе мезоскопической ориентационной упорядоченности составляющих её частиц, в частности, использование введённого автором параметра локального ориентационного порядка.
- Применение указанного метода исследования к модели твёрдых дипольных сфер и модели Штокмайера в рамках численного моделирования, выявившее наличие ориентационного порядка на мезоскопических масштабах в низкотемпературных фазах указанных моделей в широком диапазоне концентраций.
- Описание топологии фазовой диаграммы модели Штокмайера, основанной на анализе мезоскопического порядка (рис. 3).
- Наличие колончатой фазы в моделях дипольных сфер, полученной в рамках численного моделирования впервые.
- Фазовая диаграмма модели Штокмайера, построенная впервые для объёмной доли частиц $\rho = 0.3$ (рис. 8).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 63 страницы, а список литературы содержит 65 наименований.

Содержание работы

Введение содержит обзор литературы, обоснование актуальности диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов.

Глава 1 содержит описание основных методов и технических численных приёмов исследования, применяемых в работе. В качестве моделей ферромагнитных

жидкостей выбирается класс т.н. моделей дипольных сфер, представляющих собой ансамбль сферических частиц с дипольным моментом в центре. Сферическая форма обусловлена изотропным парным потенциалом, который начинает быстро расти, когда расстояние между частицами становится меньше размера частицы. Самые распространённые варианты таких моделей включают модель *Кеезома* (твёрдые сферы) с потенциалом

$$U_{hs}^{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } r_{ij} \geq d, \\ \infty, & \text{если } r_{ij} < d. \end{cases}$$

и модель *Штокмайера*, для которой изотропная часть потенциала имеет вид потенциала Леннарда-Джонса

$$U_{lj}^{i,j} = 4\epsilon \left[\left(\frac{d}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{d}{r_{ij}} \right)^6 \right].$$

Соответствующий парный потенциал в указанных моделях дополнен диполь-дипольным членом

$$U_{dd}^{i,j} = \frac{\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} - 3 \frac{(\mathbf{m}_i \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j))(\mathbf{m}_j \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j))}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^5}.$$

В приведённых формулах \mathbf{r}_i – радиус-вектор i -й частицы, d – её размер, а \mathbf{m}_i – вектор дипольного момента. Также используется обозначение $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$.

В качестве основной гипотезы предполагается, что указанная модель довольно хорошо описывает ферромагнитные жидкости. Это предположение подтверждается согласованностью получаемых результатов, получаемых в рамках модели и в эксперименте.

Несмотря на простоту формулировки данного класса моделей, их теоретический анализ встречает значительные трудности. Так аналитически удаётся рассмотреть лишь предельные случаи, например, высоких температур или очень малых концентраций. В этих приближениях налагаемые условия фактически позволяют пренебречь взаимодействием частиц и рассматривать модели посредством теории возмущений идеального газа. Для указанных моделей это проделали *Кеезом* [5] и *Штокмайер* [6], получившие выражения для вторых вириальных коэффициентов для моделей, позже названных в их честь.

Основной интерес, однако, вызывает изучение свойств системы при умеренных концентрациях, когда объёмная доля частиц ρ составляет порядка 0.1 (отношение объёма частиц к объёму всей системы). В этом случае система имеет сложную мезо-

скопическую структуру, в литературе часто называемую *сетевой*. При таком устройстве одно и то же значение внутренней энергии может быть реализовано большим количеством конкретных конфигураций, поэтому энтропия играет значительную роль, и её вычисление составляет одну из аналитически неразрешимых на сегодняшний день проблем этой области. По этой причине основным методом исследования моделей дипольных сфер в этой области параметров является численное моделирование.

Для моделирования термодинамических ансамблей систем многих частиц используются два основных направления: численное решение механических уравнений Ньютона (“молекулярная динамика”) и метод Монте-Карло. Первый метод позволяет изучать динамические свойства таких систем, которые, как свидетельствуют работы по этому вопросу, [7, 8], представляют значительный интерес.

Нас в первую очередь интересовала фазовая диаграмма моделей дипольных сфер, и был выбран второй метод. Остановимся на ряде особенностей проведённого в работе моделирования. Алгоритм моделирования был избран следующий.

Шаг 1. Построение случайной начальной конфигурации с заданной объёмной долей частиц. Запуск алгоритма Метрополиса для заданной высокой температуры, в которой заведомо будет наблюдаться газовая фаза (энергия тепловых флуктуаций значительно превосходит энергию парных взаимодействий).

Шаг 2. По окончании работы алгоритма температура понижается на небольшое значение, после чего вновь запускается алгоритм Монте-Карло, причём в качестве начальной конфигурации выбирается полученная на предыдущем шаге конечная конфигурация.

Шаг 3. Повторение шага 2 до тех пор, пока температура не достигнет заданного минимального значения. Последнее обычно бралось близким к нулю.

Результатом работы алгоритма служит некоторая последовательность состояний, соответствующая охлаждению системы. При этом, для каждого значения температуры вычислялись параметры системы, такие как теплоёмкость или значение внутренней энергии. Все вычисления проводились на высоком уровне: значительное число частиц (порядка 5000), построение длинной цепи Маркова – порядка 10^8 шагов Монте-Карло на каждую температуру, – и применение схемы *replica exchange*, улучшающей сходимость алгоритма. Для примера отметим, что численные результаты, полученные нашими предшественниками до 2005 года обычно использовали

512 частиц и меньше, [9]. Подобная разница обусловлена значительным прогрессом в области средств вычисления, а также развитием алгоритмов моделирования.

В завершении главы приводится вывод приведённых величин, которые удобно использовать в моделировании, а также их значения (по порядку величин), отвечающие случаю ферромагнитных жидкостей. Приведём здесь лишь формулы для приведённых величин температуры и дипольного момента, которые будут использоваться в дальнейшем в этом тексте.

При рассмотрении модели Штокмайера мы вслед за авторами работы [9] будем измерять энергию в единицах, равных характерной величине потенциала Леннарда-Джонса U_{lj} . Для этого рассмотрим т.н. приведённый дипольный момент

$$m^* = \frac{m}{\sqrt{d^3 \epsilon}},$$

где через m обозначен дипольный момент частицы ($m = |\mathbf{m}_i|$), а d – её размер. После такой перенормировки остаётся один определяющий параметр модели m^* . Аналогичным образом нормируется и температурная шкала $kT^* = \frac{kT}{\epsilon}$.

В дальнейшей при рассмотрении модели Штокмайера предполагается значение $m^* \sim 2 - 5$.

Глава 2 посвящена основному инструменту, который используется в работе для анализа фазовой диаграммы систем дипольных сфер, а именно, мезоскопическому параметру локального ориентационного порядка. Главная мысль, развёрнутая в этой главе, заключается в том, что когда температура модельной системы оказывается меньше некоторого критического значения T_c , микроскопическая структура фазы обладает свойством ближней ориентационной упорядоченности дипольных моментов частиц. Интуитивно это соображение понять достаточно просто: минимум потенциальной энергии двух дипольных моментов достигается при такой конфигурации, когда они сонаправлены, расположены на одной прямой, и расстояние между ними минимально. В соответствии с такой идеей, при малых концентрациях $\rho \sim 0.01$ при низких температурах в модели Кеезома (и в модели Штокмайера с преобладающими дипольными взаимодействиями) образуется цепочечная фаза, [9, 10]. Её фрагменты приведены на рисунке 1. Подобная агрегация наблюдается в реальных ферромагнитных жидкостях [11], в связи с чем имеется ряд теоретических работ по описанию статистических и топологических свойств образующихся цепочек, [12, 13].

Увеличение концентрации приводит образованию более сложных конструкций,

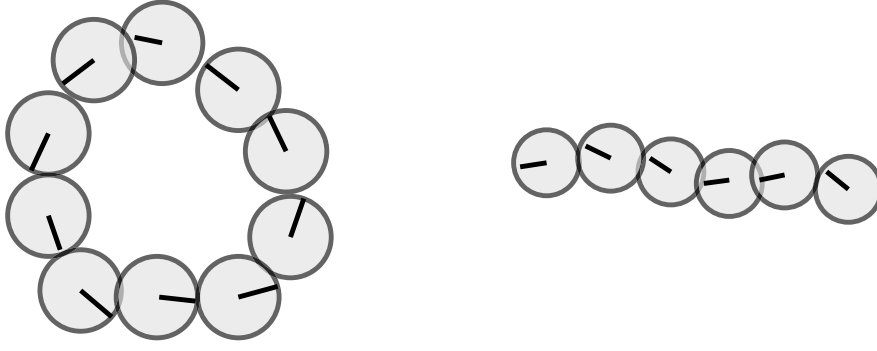


Рис. 1. Фрагменты низкотемпературной фазы в модели Кеезома при концентрациях порядка $\rho \sim 0.01$

примеры которых изображены на рисунке 2.

Приведённые интуитивные соображения, однако, не столь уж очевидны в случае значительной плотности частиц, поскольку предсказать конфигурацию с минимальной энергией для кластера из четырёх близко расположенных дипольных частиц, вообще говоря, сложно.

Главным результатом этой главы является то наблюдение, что подобная локальная упорядоченность диполей при низких температурах сохраняется вплоть до умеренных концентраций $\rho \sim 0.3$ и выше, что было установлено в моделировании. Для количественного описания локальной упорядоченности введём величину

$$L(\mathbf{r}_i) = \frac{1}{N} \sum_{0 \leq j \leq N} \frac{d^2}{|\mathbf{m}_i| |\mathbf{m}_j| (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2},$$

где суммирование ведётся по всем номерам частиц j . Проводя термодинамическое усреднение указанной величины, введём *параметр локального ориентационного порядка*

$$G = \langle \sum_{i=0}^N L(\mathbf{r}_i) \rangle, \quad (1)$$

который и будет характеризовать локальную со-ориентированность дипольных моментов частиц в фазах. Построенный параметр порядка представляет собой интеграл от полной корреляционной функции, учитывающей ориентацию диполей. По этой причине его можно оценить экспериментально на основе данных по магнитному рассеянию нейтронов.

Анализ поведения построенного параметра позволяет построить фазовую диаграмму, приведённую на рисунке 3 (для модели Штокмайера при значении приве-

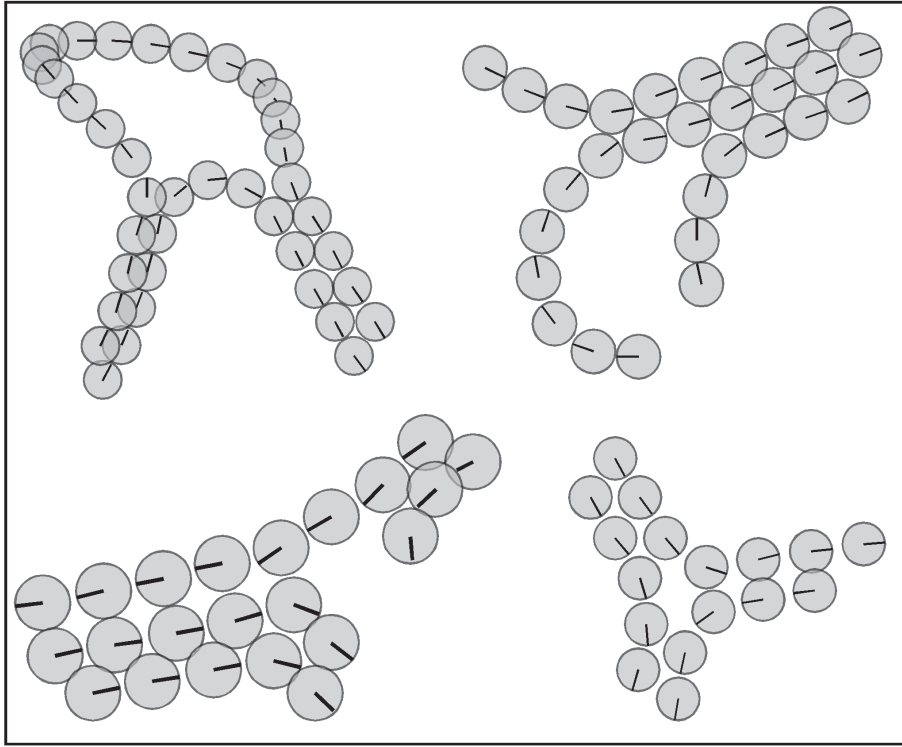


Рис. 2. Фрагменты низкотемпературной фазы в модели Кеезума при концентрациях порядка $\rho \sim 0.03$

дённного диполя $m^* = 3.5$).

На этом рисунке различаются три области: области фаз без локального ориентационного порядка соответствуют близкие к нулю значения параметра G . В области перехода наблюдается значительный рост данного параметра, и, наконец, в области локально упорядоченных фаз G имеет уже значение, существенно отличное от нуля и темп его роста с понижением температуры значительно замедляется.

Пример температурной зависимости параметра локального ориентационного порядка и внутренней энергии приведён на рисунках 4 и 5.

Глава 3 посвящена обнаруженной в моделировании колончатой фазе. Идея о существовании подобной фазы высказывалась ещё в цикле работ немецкой группы *S.Dietrich*'а [14–16]. Используемые при этом соображения аналогичны физике доменной структуры ферромагнетиков: все дипольные моменты не могут быть сонаправлены, поскольку в этом случае общий дипольный момент систем будет очень большим, а вместе с ним и энергия поля. По этой причине должны возникать антипараллельные домены.

В проведённом нами моделировании была обнаружена колончатая фаза, что

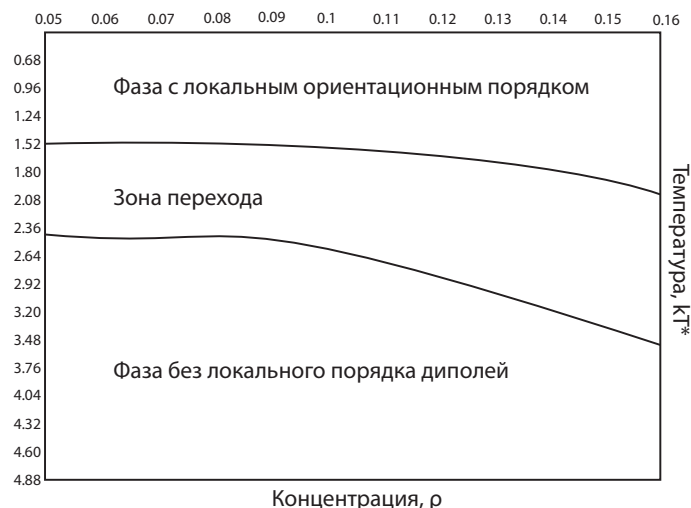


Рис. 3. Фазовая диаграмма модели Штокмайера, полученная на основе анализа локального ориентационного порядка.

является главным результатом, которому посвящена глава. Согласно нашим вычислениям эта фаза состоит из плотных вытянутых вдоль одной оси доменов. При этом, в каждом домене дипольные моменты частиц сонаправлены и параллельны оси домена.

В случае модели Кеезома (твёрдых шаров), домены имеют объёмноцентрированную тетрагональную упаковку, в то время как в случае модели Штокмайера тип упаковки объёмноцентрированный ромбический. На рисунке 6 приведена конфигурация одной из полученных колончатых структур. В этом случае домены имеют цилиндрическую форму, причём его основание имеет форму, близкую к кругу.

Важно отметить, что как форма, так и относительное расположение доменов в пространстве могут различаться. Так, например, нам удалось выделить два типа расположения колонок, схематично показанных на рисунке 7. В случае (а) с этого рисунка ортогональное к оси сечение колонки имеет прямоугольную форму.

Глава 4 объединяет в идеи предыдущих глав; в ней строится фазовая диаграмма модели Штокмайера на основе полученных в моделировании знаний о поведении параметра локального ориентационного порядка, внутренней энергии, а также анализа мгновенных конфигураций моделируемой системы. Основной результат приведён на рисунке 8, который подробно рассматривается в этой главе.

На рисунке представлена фазовая диаграмма модели Штокмайера в зависимости от температуры и значения приведённого дипольного момента m^* . Концентра-

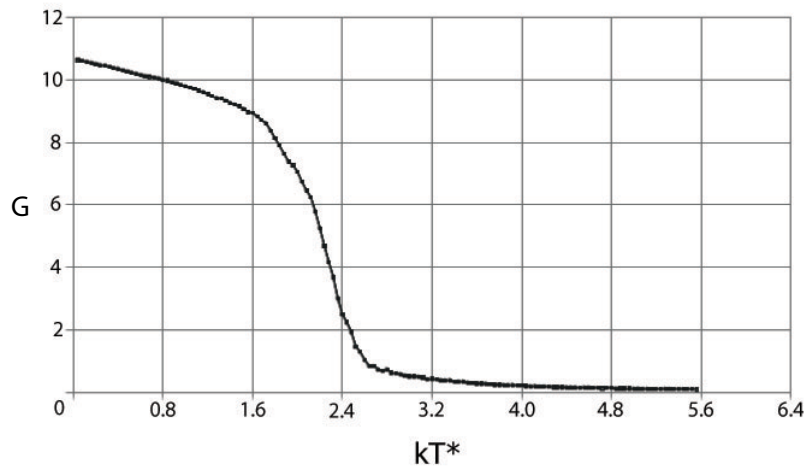


Рис. 4. Температурная зависимость параметра локального ориентационного порядка, $\rho = 0.08$, $m^* = 3.5$.

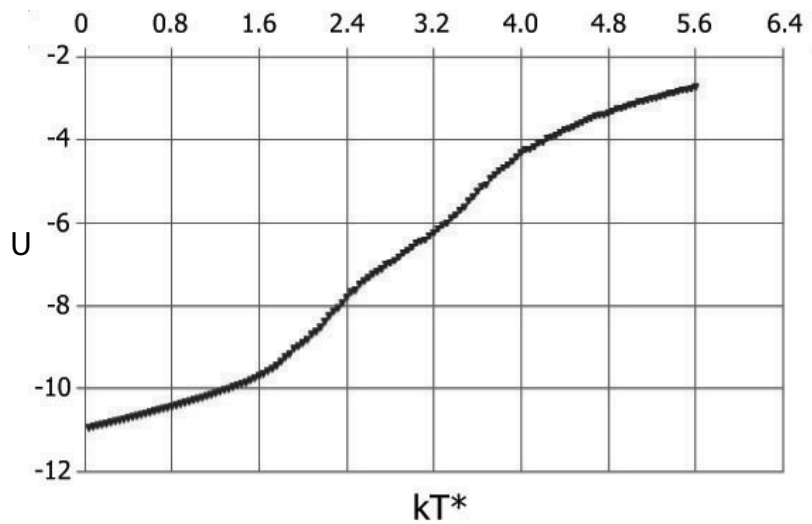


Рис. 5. Температурная зависимость внутренней энергии, $\rho = 0.08$, $m^* = 3.5$.

ция частиц постоянна на всей диаграмме и равна $\rho = 0.3$. Изменение концентрации приводит к изменению численных значений критических температур, этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании.

Таким образом, приведённая диаграмма содержит информацию о концентрации, дипольном моменте и температуре, при которых возможно наблюдение колончатой фазы. Естественно, грубость модели позволяет делать количественные оценки лишь по порядку величины. В этом отношении, приведённые данные могут способствовать экспериментальному обнаружению колончатой фазы в рамках ферромагнитных коллоидных систем.

Отметим, что в модели Кеезома также наблюдается колончатая фаза, причём

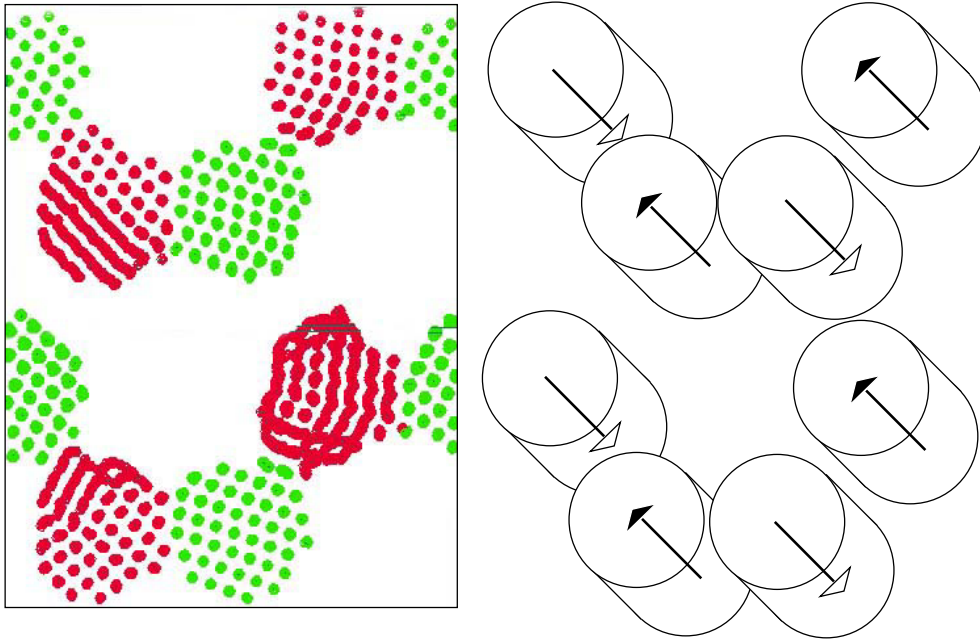


Рис. 6. Полученная в вычислениях конфигурация частиц в колончатой фазе (слева). Справа приведено её схематичное изображение.

она образуется при значительно меньших концентрациях ($\rho \sim 0.15$ для диполя $m = 5$).

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Исследовано термодинамическое поведение NVT-ансамбля основных моделей ферромагнитных жидкостей в зависимости от температуры, концентрации и величины дипольного момента отдельной частицы. При этом исследование было основано на понятии *локального ориентационного порядка*. Была введена величина, количественно характеризующая локальную ориентацию диполей частиц (то, насколько сонаправлены близкие частицы в объёме системы). Данное соображение было применено в исследовании моделей дипольных сфер впервые.
2. Проведено исследование свойств моделей ферромагнитной жидкости при различных концентрациях. До этого модели твёрдых дипольных сфер и Штокмайера изучались при низких и высоких концентрациях. Введённый в диссертации параметр локального порядка оказался одинаково эффективным средством описания фазового поведения рассмотренных систем в широком диапазоне концен-

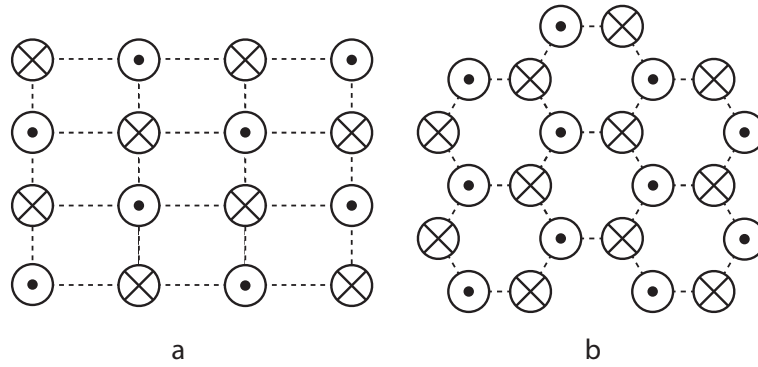


Рис. 7. Различные типы порядка колонок, которые наблюдались в моделировании. Кружками схематично изображены сечения колонок плоскостью, перпендикулярной к их осям. Крестом показано направление дипольным моментов в домене от нас, точкой – на нас.

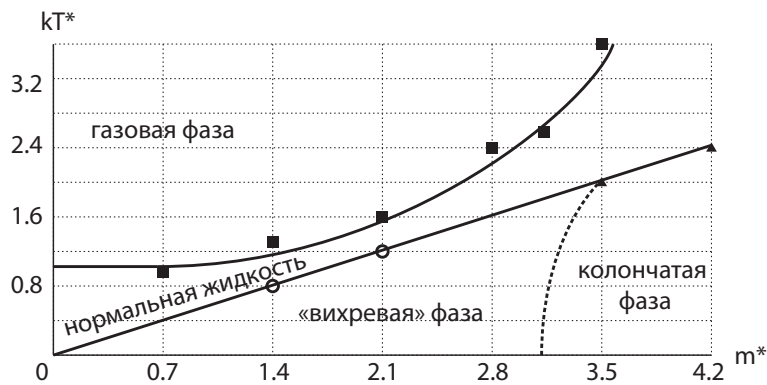


Рис. 8. Фазовая диаграмма жидкости Штокмайера при $\rho = 0.3$, полученная нами на основании анализа поведения параметра локального ориентационного порядка.

траций.

3. В моделях дипольных сфер была впервые численно найдена колончатая фаза. Ранее её существование лишь предполагалось в качестве гипотезы. По своей группе симметрий найденная фаза может быть сопоставлена с жидким кристаллом; переход в колончатую фазу в рамках рассматриваемых нами моделей описывается введённым параметром локального ориентационного порядка. Существование такой фазы может соответствовать жидкокристаллическому состоянию, возникающему в результате диполь-дипольных сил.

4. На основании введённого параметра порядка построена фазовая диаграмма модели Штокмайера при значении концентрации магнитных частиц $\rho = 0.3$. Следует отметить, что область применения моделей дипольных сфер не ограничивается ферромагнитными жидкостями. В этом отношении полученные результаты могут найти применение в описании других физических систем.

Благодарности Автор работы выражает искреннюю благодарность научному руководителю Войславу Любомировичу Голо за неоценимую помощь в подготовке работы. Автор благодарит Ю.М. Брука, С.С. Вергелеса, А.Ю. Зубарева, В.В. Лебедева и R. Nentschke за полезные замечания и обсуждение работы. Автор выражает благодарность ВЦ МГУ за предоставление возможности проведения расчётов.

Публикации по теме диссертации

1. В.Н. Блинов, В.Н. Буравцев, Т.И. Макарова, А.И. Полетаев *Самоорганизация системы дипольных частиц в модели Кеезома*. ВМУ Серия 3. Физика. Астрономия, **4**, 34-39 (2013).
2. Блинов В.Н. *Колончатая фаза в модели Штокмайера*. ЖЭТФ, **144**(2), 397 (2013).
3. В.Н. Блинов, В.Л. Голо *Локальный ориентационный порядок в модели Штокмайера*. Письма в ЖЭТФ, **96**(7), 523 (2012).

Литература

- [1] Magnetic field guided colloidal assembly / A.Nych, U.Ognysta, M.Skarabot et al. // *Nature Communications*. — 2013. — Vol. 4. — P. 1489.
- [2] M.Wang, L.He, Y.Yin. Magnetic field guided colloidal assembly // *Materials Today*. — 2013. — Vol. 16(4). — Pp. 110–116.
- [3] Preparation and properties of an aqueous ferrofluid / P.Berger, N.B.Adelman, K.J.Beckman et al. // *J. Chem. Ed.* — 1999. — Vol. 76(7). — Pp. 943–948.
- [4] E.L.Resler, R.E.Rosensweig. Magnetocaloric power // *AIAA J.* — 1964. — Vol. 2(8). — P. 1418.
- [5] W.H.Keesom // *Comm. Phys. Lab. Leiden, Suppl.* — 1912. — Vol. 24B. — P. 32.
- [6] W.H.Stockmayer. Second virial coefficients of polar gases // *J. Chem. Phys.* — 1941. — Vol. 9. — P. 398.
- [7] Magnetic properties of ferrocolloids: the effect of interparticle interactions / K.I.Morozov, A.F.Pshenichnikov, Yu.L.Raikher, M.I.Shliomis // *J. Magn. Magn. Mater.* — 1987. — Vol. 65. — Pp. 269–272.
- [8] M.I.Shliomis, Yu.L.Raikher. Experimental investigations of magnetic fluids // *IEEE*. — 1980. — Vol. MAG-16(2). — Pp. 237–251.
- [9] J.-J.Weis, D.Levesque. Simple dipolar fluids as generic models for soft matter // *Adv. Polym. Sci.* — 2005. — Vol. 185. — Pp. 163–225.
- [10] K.Van Workum, J.F.Douglas. Equilibrium polymerization in the stockmayer fluid as a model of supermolecular self-organization // *Phys. Rev. E*. — 2005. — Vol. 71. — P. 031502.
- [11] K.Butter et al. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy // *J.Phys.: Condens.Matter*. — 2003. — Vol. 15. — P. S1451.
- [12] А.Ю.Зубарев, Л.Ю.Искакова. К теории фазовых переходов в магнитных жидкостях // *ЖЭТФ*. — 2007. — Т. 132(5). — С. 1160–1177.

- [13] Микроструктура бидисперсной феррожидкости в тонком слое / Е.С.Минина, А.Б.Муратова, Дж.Серда, С.С.Канторович // *ЖЭТФ*. — 2013. — Т. 143(3). — С. 486–506.
- [14] *P.Frodl, S.Dietrich*. Bulk and interfacial properties of polar and molecular fluids // *Phys. Rev. A*. — 1992. — Vol. 45. — P. 7330.
- [15] *B.Groh, S.Dietrich*. Ferroelectric phase in stockmayer fluids // *Phys. Rev. E*. — 1994. — Vol. 50. — P. 3814.
- [16] *B.Groh, S.Dietrich*. Structural and thermal properties of orientationally ordered dipolar fluids // *Phys. Rev. E*. — 1996. — Vol. 53. — P. 2509.