На правах рукописи

СЁМКИН Сергей Викторович

Методы усреднения по обменным полям в исследовании магнитных состояний чистых и разбавленных магнетиков

Специальность 01.04.02. – Теоретическая физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Владивосток 2021

Работа выполнена на кафедре Информационных технологий и систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса».

Научный консультант: Смагин Виктор Павлович, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: Пячин Сергей Анатольевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры Физики и теоретической механики Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск

Удодов Владимир Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Хакасского государственного университета, г. Абакан

Харитонский Петр Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (г. Хабаровск)

Защита состоится 4 июня 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.056.08 на базе ФГАОУ ВО «Дальневосточный Федеральный Университет» по адресу 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, кампус ДВФУ, корпус А (24), 11 уровень, зал заседаний диссертационных советов.

С диссертацией можно познакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Дальневосточный Федеральный Университет» и на официальном сайте университета по адресу https://www.dvfu.ru/science/dissertation-tips/analytical-platform-of-dissertations/detail.php?ID=39239240&IBLOCK_ID=1156

Автореферат разослан «___» __________ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.ф.-м. н. Дьяченко Дьяченко О.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование поведения систем многих взаимодействующих частиц, таких, например, как магнетики является одной из центральных проблем физики твердого тела и статистической механики. Эта проблема стала особенно актуальной в последнее время в связи с открытием все большего числа новых магнитных систем, таких как спиновые стекла, спиновый лед или магнитные материалы с управляемыми свойствами. Весьма эффективным инструментом анализа таких систем являются решеточные модели, например, модель Изинга, модель Поттса или модель Гейзенберга. Эти и другие решеточные модели могут во многих случаях и сами по себе служить достаточно точным описанием реальных систем, а кроме того, принцип универсальности позволяет распространить результаты, полученные для простых решеточных моделей и на более сложные системы. Решеточные модели могут быть сформулированы не только для «чистых» магнетиков, с трансляционной симметрией гамильтониана, но и для систем с немагнитным или иным разбавлением или для магнетиков со случайными магнитными полями. Такие неупорядоченные и неоднородные магнитные системы являются в некотором смысле более интересным объектом исследования, чем «чистые» магнетики, поскольку неупорядоченные системы характеризуются бо́льшим числом магнитных состояний и более сложной реакцией на изменение внешних параметров.

К сожалению, эффективность решеточных моделей для анализа магнетиков и других систем взаимодействующих частиц ограничена, как правило, невозможностью получить точное решение в подавляющем большинстве случаев. Известное решение Онсагера для двумерной модели Изинга на квадратной решетке в отсутствии внешнего поля является одним из редких исключений из этого правила. В случае магнетиков с примесями или других неупорядоченных систем точных решений практически никогда не удается получить. Более того, в этом случае затруднительно указать даже общие свойства фазовых переходов и критических явлений.

В предлагаемой работе представлено несколько новых подходов к нахождению приближенных решений как для чистых, так и разбавленных решеточных моделей. Это, во-первых, дальнейшее развитие метода усреднения по локальным полям взаимодействия в различных направлениях. Во-вторых, использование кластеров различного размера и конфигурации как для усреднения по локальным полям, так и для построения ренормгруппового преобразования фиксированного масштаба. И в-третьих, метод псевдохаотического распределения примесей для анализа разбавленных магнетиков. Все эти методы как в общей постановке, так и применительно к конкретным задачам рассмотрены в настоящей работе.

Цель диссертационной работы - разработка эффективных методов учета влияния подвижных и вмороженных примесей на макроскопические характеристики разбавленных магнетиков. Кроме того, целью работы является исследование с помощью этих методов магнитных фазовых переходов и магнитных состояний в моделях разбавленных магнетиков. Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Развитие метода усреднения по обменным полям путем применения его к кластерам магнитных атомов и построения ренормгруппового преобразования на этой основе. Применение этого метода к магнетикам Изинга, Поттса и Гейзенберга с изотропным и анизотропным взаимодействием.

2. Распространение метода усреднения по обменным полям в обобщенной, «кластерной» форме на разбавленные по узлам и связям решеточные магнетики. Применение метода к разбавленному по узлам или связям изинговскому решеточному магнетику, нахождение порогов протекания и концентрационной зависимости температуры Кюри.

3. Применение обобщенного метода усреднения по обменным полям к задаче о нахождении корреляционных функций чистого и разбавленного изинговского магнетика.

4. Применение метода усреднения по полям к анализу магнитных состояний магнетика с подвижными немагнитными примесями, находящимися в термодинамическом равновесии с магнитной подсистемой.

5. Формулировка условий, при которых подвижные немагнитные примеси распределены близко к хаотическому распределению вмороженных примесей («псевдохаотическое» распределение).

Научная новизна

1. Впервые сформулирован и обоснован метод усреднения по локальным обменным полям (или в более общей форме – метод усреднения по конфигурациям соседних спинов). Предложено использование кластеров как для обобщения метода усреднения по локальным полям, так и для построения ренормгруппового преобразования фиксированного масштаба. Все эти методы обобщены на случай разбавленных магнетиков.

2. Впервые получено точное решение для одномерной модели Изинга с неподвижными, хаотично расположенными немагнитными примесями. Решена одномерная модель Изинга с подвижными немагнитными примесями. Для этой модели найдены корреляционные функции. Показано, что с помощью подбора параметров межатомного взаимодействия, систему с подвижными примесями, находящимися в термодинамическом равновесии, можно приблизить к системе с вмороженными примесями (псевдохаотическое приближение).

3. Предложена интерпретация приближения Бете, основанная на сопоставлении спиновых кластеров различного размера на дереве Кейли. На основе этой интерпретации развит метод построения приближения Бете для разбавленного по узлам или связям изинговского магнетика.

4. Найдены корреляционные функции и решение задачи о разбавленном изинговском магнетике на решетке Бете в псевдохаотическом приближении.

5. Получено решение для модели Поттса на решетке Бете с немагнитными примесями в псевдохаотическом приближении. Найдена температура фазового перехода, намагниченность и величина скачка спонтанной намагниченности при температуре фазового перехода. Исследовано влияние немагнитного разбавления на всю линию фазовых переходов первого рода в модели Поттса на решетке Бете во внешнем поле.

6. Построен класс приближенных решений задачи Изинга с немагнитным разбавлением, являющийся обобщением приближения Бете. Показано, что некоторые из приближений этого класса можно интерпретировать как точные решения для модели Изинга на рекурсивных решетках.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты, полученные в работе, имеют фундаментальную теоретическую значимость. Метод усреднения по локальным обменным полям, в том виде, в котором он развит в диссертационной работе, может быть использован для анализа поведения широкого класса систем многих частиц с конечным радиусом взаимодействия. Важное теоретическое значение имеет развитый в работе способ связи вмороженного и расплавленного беспорядка в разбавленных магнетиках (псевдохаотическое распределение). Как показано в работе, эта связь может быть построена с помощью подбора параметров межатомного взаимодействия – своих при каждом значении температуры. Теоретическое значение имеет также и впервые полученное в работе точное решение для одномерной модели Изинга с вмороженными примесями.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Теоретическое обоснование и обобщение метода усреднения по локальным полям взаимодействия. Доказательство того, что в системе взаимодействующих частиц любое термодинамическое среднее некоторой величины всегда может быть вычислено в два этапа. На первом этапе величина вычисляется по кластеру частиц, при фиксированном внешнем окружении. На втором – производится усреднение по конфигурациям этого окружения.

Построенная на основе такого представления термодинамических средних общая схема получения самосогласованных уравнений, включающая в себя как известные способы (метод среднего поля, приближение Бете, метод усреднения по обменным полям), так новые.

2. Точное решение для одномерной модели Изинга с неподвижными, хаотично расположенными немагнитными примесями. Найденные для этой модели зависимости намагниченности и парной корреляции от температуры, внешнего поля и концентрации примесей.

3. Точное решение модели Изинга с подвижными немагнитными примесями на решетке Бете. Зависимость критических концентраций примесей от параметров межатомного взаимодействия.

4. Метод псевдохаотического приближения. Предположение о полной некоррелированности псевдохаотического распределение в области нулевой намагниченности для любой решетки. Обоснование этого предположения расчетом корреляционных функций для модели Изинга с немагнитным разбавлением на решетке Бете. Полученное для этой модели выражение для магнитной восприимчивости.

5. Решение для модели Поттса на решетке Бете с немагнитными примесями в псевдохаотическом приближении. Полученные в этом приближении температура фазового перехода, намагниченность и величина скачка спонтанной намагниченности при температуре фазового перехода. Влияние немагнитного разбавления на всю линию фазовых переходов первого рода в модели Поттса на решетке Бете во внешнем поле.

6. Построенный класс приближенных решений задачи Изинга, являющийся обобщением приближения Бете. Доказательство того, что некоторые из приближений этого класса можно интерпретировать как точные решения для модели Изинга на рекурсивных решетках. Расширение этого класса на модель Изинга разбавленного по узлам и связям магнетика.

Достоверность научных результатов подтверждается независимыми численными расчетами; близостью результатов, полученных в различных приближениях, их сравнением с точными решениями; качественной сходимостью экспериментальных и теоретических данных; непротиворечивостью используемых моделей и основных положений статистической физики.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на всероссийских научных конференциях: 56, 57, 58, 59, 60 и 62 Всероссийской научной конференции. Владивосток

Публикации По теме диссертации опубликовано 1 монографий, 23 статьи в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в БД Scopus, Web of Science и Перечень ВАК и 32 работы в сборниках трудов и тезисов научных конференций.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, в которых приведены основные результаты и выводы, а также списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 182 страницы и включает 43 рисунка, 9 таблиц и 94 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении очерчен круг задач, решению которых посвящена работа, сформулирована цель диссертации, актуальность темы, определен подход, в рамках которого автор решает поставленные задачи и кратко перечислены основные полученные результаты. Дана краткая характеристика работы по главам.

В главе 1 сформулированы физические принципы, лежащие в основе математических моделей фазовых переходов в чистых и разбавленных магнетиках, рассмотрена решеточная модель с парным взаимодействием общего вида для чистого и разбавленного магнетиков и приведены общие подходы к теоретическому анализу решеточных моделей. Сформулирован и обоснован метод усреднения по локальным обменным полям (или в более общей форме – метод усреднения по конфигурациям соседних спинов). Этот метод заключается в следующем. Рассмотрим систему из N взаимодействующих частиц, каждая из которых характеризуется некоторым параметром σ, который в дальнейшем будем называть *спином*. Обозначим Ω множество всех этих спинов, а гамильтониан системы $\mathcal{H}(\Omega)$. Конкретный вид гамильтониана значения не имеет, но мы будем полагать, что для каждого спина σ_i в гамильтониане есть конечное число слагаемых, содержащих σ_i. Причем это число остается конечным и в термодинамическом пределе $N \to \infty$. Два спина σ_i и σ_j будем называть взаимодействующими, если в гамильтониане есть слагаемое не аддитивно зависящее от σ_i и σ_j.

Рассмотрим в системе группу, содержащую n спинов. Такую группу мы будем в дальнейшем называть *кластером*. Множество входящих в кластер спинов будем обозначать c. Обозначим r множество не входящих в кластер спинов, каждый из которых взаимодействует хотя бы с одним спином кластера и обозначим s множество всех остальных спинов. Очевидно, Ω является объединением непересекающихся множеств c, r и s.

Выделим теперь в гамильтониане слагаемые, связанные с взаимодействием спинов принадлежащих c и r:

$$\mathcal{H}(\Omega) = \mathcal{H}_c(c, r) + \mathcal{H}_s(r, s).$$

Гамильтониан $\mathcal{H}_c(c, r)$ содержит только слагаемые, зависящие от спинов кластера c и слагаемые, описывающие взаимодействие спинов кластера со спинами из множества r. Гамильтониан $\mathcal{H}_s(r, s)$ – содержит все остальные слагаемые, входящие в $\mathcal{H}(\Omega)$. Тогда статистическую сумму системы можно записать в виде

$$Z = \sum_r Z_c(r)\, Z_s(r), \tag{1}$$

где

$$Z_s(r) = \sum_s \exp\left(-\frac{1}{kT}\mathcal{H}_s(r,s)\right) \text{ и } Z_c(r) = \sum_c \exp\left(-\frac{1}{kT}\mathcal{H}_c(c,r)\right).$$

Каждое слагаемое в (1) имеет смысл (ненормированной) вероятности того, что система спинов r будет находиться в некотором состоянии. Нормированная вероятность

$$W(r) = Z_c(r)Z_s(r)/Z$$

есть функция распределения для наборов состояний спинов, взаимодействующих с кластером.

Пусть $f(r)$ некоторая функция спинов, принадлежащих r, а $g(c)$ некоторая функция кластерных спинов c. Тогда среднее по ансамблю значение произведения fg можно представить в виде

$$\langle fg \rangle = \frac{1}{Z}\sum_r f(r)(\sum_c g(c)\exp\left(-\frac{1}{kT}\mathcal{H}_c(c,r)\right))\, Z_s(r).$$

Разделив и умножив каждое слагаемое в этой сумме на «кластерную» статсумму $Z_c(r)$, запишем полученное выражение в виде:

$$\langle fg \rangle = \sum_r f(r)\langle g \rangle_r\, W(r), \tag{2}$$

где

$$\langle g \rangle_r = \frac{1}{Z_c(r)}\sum_c g(c)\exp\left(-\frac{1}{kT}\mathcal{H}_c(c,r)\right). \tag{3}$$

Формулу (2) можно интерпретировать следующим образом. Выражение (3) можно понимать как «кластерное среднее» функции $g(c)$, вычисленное при условии, что конфигурация взаимодействующих с кластером спинов задана и неизменна. Выражение (2) в этом случае можно понимать как усреднение произведения $f(r)\langle g \rangle_r$ по функции распределения $W(r)$. На использовании формул (2) – (3) и основан метод усреднения по полям взаимодействия.

Во многих моделях может оказаться так, что «кластерный» гамильтониан $\mathcal{H}_c(c,r)$, входящий в (3), оказывается зависящим от одной или нескольких функций величин σ_j, например, от суммы этих величин или от суммы их квадратов. В модели Изинга или Гейзенберга на решетке с координационным числом q для кластера из одного узла, содержащего спин σ_0

$$\mathcal{H}_1(\sigma_0,r) = -J\sigma_0\sum_{j=1}^{q}\sigma_j - \sigma_0 H_e \tag{4}$$

в модели Поттса с тремя состояниями гамильтониан $\mathcal{H}_1(\sigma_0,r)$ можно представить как функцию $\sum_{j=1}^{q}\sigma_j$ и $\sum_{j=1}^{q}\sigma_j^2$. Такие функции можно назвать «полями взаимодействия», а усреднение в (3) становится, фактически, усреднением по функции распределения этих полей. Действительно, пусть, например, гамильтониан $\mathcal{H}_1(\sigma_0, r)$ зависит только от $h = \sum_{j=1}^{q} \sigma_j$. Функция

$$W(h) = \sum_{\{\sigma_j\}} \delta(h - \sum_{j=1}^{q'} \sigma_j) W(\{\sigma_j\})$$

и есть функция распределения по полям взаимодействия h.

В главе 1 показано, что известные приближенные методы, такие как метод среднего поля, приближение Бете и некоторые другие можно трактовать как варианты усреднения по полям взаимодействия при различных способах приближенной оценки для функции распределения по полям взаимодействия. То есть, методика усреднения по полям взаимодействия или, в более широком смысле, по конфигурациям спинов, взаимодействующих с данным спином, позволяет в рамках единого подхода рассмотреть и сопоставить известные приближенные методы. Кроме того, в главе 1 сформулированы подходы к построению новых приближенных методов анализа систем многих взаимодействующих частиц на основе усреднения по полям взаимодействия. С одной стороны, можно построить уравнения (2) и (3) не для одиночного спина, а для кластера большего числа спинов и развить на основе этих уравнений приближенные методы. С другой стороны, можно построить некий вариант ренормгруппового преобразования фиксированного масштаба, сопоставляя различные кластеры между собой.

Также в главе 1 показано, что метод усреднения по полям взаимодействия можно распространить на системы с немагнитным или иным типом разбавления и сформулированы основные подходы для такого распространения. А именно, можно использовать как «традиционную» схему самоусреднения, так и еще один, несколько иной подход к анализу свойств разбавленных магнетиков. Вместо того, чтобы с самого начала полагать, что примеси распределены в решетке случайно, рассмотрим магнетик, в котором магнитные атомы и атомы примеси могут перемещаться и находятся в термодинамическом равновесии. Энергия такой системы определяется не только ориентацией магнитных моментов, но и расположением атомов примеси по узлам решетки. Иными словами, гамильтониан той или иной модели магнетика с подвижными примесями будет состоять из слагаемых, связанных с обменным взаимодействием магнитных атомов и слагаемых, связанных с межатомным взаимодействием в кристаллической решетке, причем равновесное распределение атомов примеси зависит от параметров, характеризующих эти взаимодействия. Тогда для каждого значения температуры, внешнего магнитного поля и концентрации (доли) магнитных атомов в системе можно подобрать значения параметров межатомного взаимодействия с таким расчетом, чтобы равновесное распределение атомов примеси было бы как можно ближе к случайному. Для такой модели можно определить несколько типов корреляционных функций, характеризующих взаимосвязь магнитных моментов и взаимосвязь расположения атомов примеси. В качестве условия близости распределения атомов примеси по узлам решетки к случайному можно использовать равенство нулю корреляции в расположении атомов примеси для двух ближайших узлов. В последующих главах работы находятся и сопоставляются результаты, полученные в рамках этих подходов для различных моделей магнетиков.

В главе 2 рассмотрена одномерная цепочка изинговских спинов как чистая, так и с немагнитным разбавлением. Как известно, одномерная цепочка является в некотором смысле «патологическим» видом кристаллической решетки – в ней не может быть фазового перехода и спонтанной намагниченности при ненулевой температуре, а при немагнитном разбавлении бесконечный кластер магнитных атомов разрушается при любой ненулевой концентрации примесей. Иными словами, рассматривая одномерную цепочку с немагнитными примесями, мы всегда находимся в области концентраций ниже порога протекания и температур выше температуры Кюри. Однако такая область существует у модели Изинга на любой решетке; можно полагать, что концентрационная зависимость температуры Кюри $T_c(b)$ стягивается в одномерном случае к единственной точке $b = 1$, $T_c = 0$. Для чистого магнетика, приближение к точке $T = 0$ можно рассматривать как приближение к точке фазового перехода со стороны высоких температур. Естественно предположить, что для разбавленной одномерной цепочки приближение к точке $b = 1, T = 0$ можно рассматривать как приближение к линии $T_c(b)$ со стороны высоких температур и малых концентраций.

Несмотря на то, что одномерную цепочку можно рассматривать как частный случай решетки Бете с координационным числом q равным двум, есть причины, по которым ее имеет смысл рассмотреть отдельно. Главная причина заключается в том, что для одномерной цепочки существует способ получения точного решения с помощью трансфер-матрицы конечных размеров. Этот метод позволяет помимо намагниченности найти корреляционную функцию на любом расстоянии, а значит, точно вычислить корреляционную длину. Следовательно, применяя к одномерной цепочке различные приближенные методы, которые можно применять и для $q > 2$, получим больше параметров, по которым можно сравнить точное и приближенные решения и точнее оценить степень эффективности каждого приближения. А кроме того, одномерные структуры с обменным взаимодействием могут быть реализованы экспериментально, а значит, их теоретическое рассмотрение имеет и самостоятельный практический интерес.

В главе 2 рассмотрено применение методов среднего поля и усреднения по обменным полям к кластерам из одного и двух атомов в линейной цепочке изинговских спинов. Получены значения намагниченности и корреляционных функций в различных приближениях. Решена одномерная модель Изинга с подвижными немагнитными примесями. Для этой модели найдены корреляционные функции. Показано, что с помощью подбора параметров межатомного взаимодействия, систему с подвижными примесями, находящимися в термодинамическом равновесии, можно приблизить к системе с вмороженными примесями.

Получено точное решение для одномерной модели Изинга с неподвижными, хаотично расположенными немагнитными примесями. Это точное решение основано на составлении рекуррентных уравнений, через решения которых выражаются намагниченность и корреляция соседних спинов. Показано, что в пределе, когда разбавленный магнетик переходит в чистый, полученное решение переходит в известное точное решение для одномерной модели Изинга. Полученное точное решение сравнивается с несколькими приближенными решениями. Были рассмотрены следующие приближенные методы: метод среднего поля, метод усреднения по обменным полям как с учетом, так и без учета корреляций и псевдохаотическое приближение. Наиболее грубым, как и следовало ожидать, оказывается метод среднего поля. Решения, полученные по методу усреднения по обменным полям, особенно с учетом корреляции, гораздо лучше согласуются с точным решением. Но наиболее близким к точному решению оказывается решение, полученное в псевдохаотическом приближении. Причем это приближение превосходит остальные приближения по точности во всем диапазоне концентраций магнитных атомов.

В главе 3 рассмотрено применение метода усреднения по полям обменного взаимодействия к кластерам из двух магнитных атомов в модели Изинга как без немагнитных примесей, так и с немагнитным разбавлением на простых решетках и построен вариант ренормгруппового преобразования фиксированного масштаба. Вначале рассмотрено применение этих методов к изинговскому магнетику на квадратной решетке с анизотропным взаимодействием. Показано, что применение метода усреднения по обменным полям к кластеру из двух магнитных атомов приводит к более точным значениям критической температуры, чем использование этого метода для одного атома. Значения критической температуры, вычисленное по самосогласованным уравнениям, наиболее близко к точному значению при построении уравнения путем сопоставления кластеров различного размера: приближение Бете точнее приближений среднего поля, аналогично – для метода усреднения по обменным полям в биноминальном приближении. Кроме того, оказалось, что использование метода усреднения по обменным полям для кластера из двух атомов позволяет точнее учесть геометрию решетки – для решеток с одинаковым координационным числом (треугольной и кубической) получаются разные результаты.

Далее в главе 3 рассмотрено обобщение метода усреднения по обменным полям на случай двухатомных кластеров и применение этого метода к анализу модели Изинга разбавленного магнетика. Вычислены температуры Кюри и перколяционные пороги для простых решеток с координационными числами 3, 4 и 6 с помощью усреднения по полям взаимодействия для кластеров различной величины. Рассмотрение кластеров различного размера также используется для построения ренормгруппового преобразования и вычисления перколяционных порогов в этом случае. Построены концентрационные зависимости температуры Кюри и спонтанной намагниченности при нулевой температуре. Показано, что применение метода усреднения по обменным полям в его ренормгрупповой форме приводит к более точным результатам во всех рассмотренных случаях и позволяет различать разбавление по узлам и по связям.

В этой же главе предложена интерпретация приближения Бете, основанная на сопоставлении спиновых кластеров различного размера на дереве Кейли. На основе этой интерпретации развит метод построения приближения Бете для разбавленного по узлам или связям изинговского магнетика. Этот метод является обобщением известного метода Бете на разбавленные магнетики. Метод дает точное значение перколяционного порога для решетки Бете. Для различных вариантов метода построена спонтанная намагниченность как при нулевой, так и при конечной температуре как функция концентрации магнитных атомов.

Глава 4 Известно, что магнитные свойства сплавов, состоящих из магнитных и не магнитных атомов, отличаются от свойств чистых магнетиков. В большинстве случаев хорошим приближением при описании разбавленных магнетиков является допущение о случайном распределении примесей по узлам решетки. Поэтому в теоретических работах, посвященных исследованию разбавленных магнетиков, случайное распределение примесей вводится, как правило, изначально.

Однако, если, например, в ходе химической реакции изменяется состав магнетика, то это означает, что магнитные атомы (или атомы примеси) могут перемещаться, и, если реакция идет достаточно медленно, система будет находиться в состоянии близком к термодинамическому равновесию. Кроме того, при изменении температуры должно происходить перераспределение немагнитных примесей по узлам решетки, которое может приводить к изменению магнитных свойств системы.

В параграфе 4.2 рассмотрено приближение среднего поля применительно к разбавленному изинговскому магнетику с подвижными примесями. Модель такого магнетика формулируется следующим образом. Допустим, что в системе существуют межатомные силы, радиус действия которых ограничен первой координационной сферой. Обозначим потенциал этих сил $-U_{\alpha\beta}$, $\alpha,\beta = 1{,}2$. Если теперь сопоставить каждому узлу решетки переменную σ_i, равную s_i когда в данном узле находится магнитный атом и нулю, когда немагнитный, то энергию обменного взаимодействия E_{ex} и кулоновскую энергию E_k можно записать в виде сумм по всем упорядоченным парам соседних узлов:

$$E_{ex} = -\sum_{(i,j)} J\sigma_i\sigma_j,$$

$$E_k = -\sum_{(i,j)}\left\{U_{11}\sigma_i^2\sigma_j^2 + U_{22}(1-\sigma_i^2)(1-\sigma_j^2) + U_{12}\left[\sigma_i^2(1-\sigma_j^2) + \sigma_j^2(1-\sigma_i^2)\right]\right\}.$$

Последнее выражение, с точностью до аддитивной константы, можно записать в виде:

$$E_k = -\sum_{(i,j)} U\sigma_i^2\sigma_j^2 - \sum_i f\sigma_i^2,$$

где $U = U_{11} + U_{22} - 2U_{12}$, $f = q(U_{12} - U_{22})$.

Учитывая, что число магнитных атомов в решетке есть $\sum_i \sigma_i^2$, запишем большую статистическую сумму системы следующим образом:

$$Z = \sum_{\{\sigma\}} \exp\left\{\left(\sum_{(i,j)}(J\sigma_i\sigma_j + U\sigma_i^2\sigma_j^2) + (f+\mu)\sum_i \sigma_i^2 + H_e\sum_i \sigma_i\right)/kT\right\},$$

где μ - химический потенциал, H_e – внешнее магнитное поле, а суммирование производится по всем возможным конфигурациям $\{\sigma\}$.

Введем величины $b = \langle\sigma_i^2\rangle$ и $m = \langle\sigma_i\rangle/b$. Ясно, что эти величины не зависят от i, поскольку все узлы решетки эквивалентны (в термодинамическом пределе) и имеют простой смысл: b - вероятность того, что в данном узле находится магнитный атом (концентрация), m - среднее значение его спина.

Для этой системы построены фазовые диаграммы и найдена зависимость намагниченность от концентрации магнитных атомов для модели Изинга с подвижными немагнитными примесями. В этом же приближении исследован фазовый переход в модели Поттса с тремя состояниями.

В параграфе 4.3 рассмотрено применение приближения Бете к системе, состоящей из магнитных и немагнитных атомов, находящихся в термодинамическом равновесии. В этом приближении построены зависимости намагниченности и температуры Кюри от концентрации магнитных атомов для модели Изинга с подвижными немагнитными примесями и найдены предельные концентрации возникновения спонтанной намагниченности в основном состоянии. Для одномерной цепочки рассмотренное приближение является точным решением (глава 2). Для чистого магнетика приближение Бете можно получить как решение задачи Изинга на решетке (дереве) Бете или как соотношение, связывающее намагниченность центрального атома и атома первой координационной сферы. Однако на приближение Бете можно смотреть и как на один из самосогласованных методов, общая схема построения которых представлена в работах главе

4. Эти методы основаны на усреднении по локальным обменным полям. Методика усреднения по локальным полям может быть использована и для анализа поведения сплава двух типов магнитных атомов, и для анализа систем, в которых обменный интеграл является непрерывной функцией расстояния между атомами. В параграфе 4.3 рассмотрено другое приближение для той же модели, которое можно рассматривать как обобщение метода Бете.

Кроме того, в главе 4 предлагается иной подход к анализу свойств разбавленных магнетиков с вмороженными немагнитными примесями. Вместо того чтобы с самого начала полагать, что примеси распределены в решетке случайно, рассмотрим магнетик, в котором магнитные атомы и атомы примеси могут перемещаться и находятся в термодинамическом равновесии. Энергия такой системы определяется не только ориентацией магнитных моментов, но и расположением атомов примеси по узлам решетки. Иными словами, гамильтониан той или иной модели магнетика с подвижными примесями будет состоять из слагаемых, связанных с обменным взаимодействием магнитных атомов и слагаемых, связанных с межатомным взаимодействием в кристаллической решетке, причем равновесное распределение атомов примеси зависит от параметров, характеризующих эти взаимодействия. Тогда для каждого значения температуры, внешнего магнитного поля и концентрации (доли) магнитных атомов в системе можно подобрать значения параметров межатомного взаимодействия с таким расчетом, чтобы равновесное распределение атомов примеси было бы как можно ближе к случайному.В параграфе 4.4 рассматривается следующая реализация этой схемы. Рассмотрим модель Изинга на решетке с координационным числом q. Пусть часть магнитных атомов замещена атомами примеси, которые могут перемещаться по узлам решетки. В этом параграфе к анализу этой модели применяется приближение Бете в варианте самосогласованного приближения. Преимущество трактовки метода Бете как самосогласованного метода заключается в том, что позволяет рассчитать помимо намагниченности или температуры Кюри еще и корреляционные функции чистого магнетика. В параграфе 4.4 также рассчитываются корреляционные функции, но для модели с подвижными примесями. Для такой модели можно определить несколько типов корреляционных функций – характеризующих взаимосвязь магнитных моментов и взаимосвязь расположения атомов примеси. В качестве условия близости распределения атомов примеси по узлам решетки к случайному, используется равенство нулю корреляции в расположении атомов примеси для двух ближайших узлов, что и является основой псевдохаотического приближения.

В главе 5 рассмотрена модель Поттса. Модель Поттса - одна из наиболее часто используемых моделей в статистической физике и она является теоретическим инструментом, применяемым для изучения широкого класса явлений в физике конденсированных сред и ядерной физике. Эта модель формулируется следующим образом. Каждому узлу решетки поставим в соответствие величину σ_i («спин») которая может принимать n различных значений, скажем $1,2, \dots n$. Два соседних спина σ_i и σ_j взаимодействуют с энергией $-J_p \delta(\sigma_i, \sigma_j)$ где

$$\delta(\sigma_i, \sigma_j) = \begin{cases} 1, & \sigma_i = \sigma_j \\ 0, & \sigma_i \neq \sigma_j \end{cases}$$

Поэтому полная энергия равна

$$E = -J_p \sum_{(i,j)} \delta(\sigma_i, \sigma_j),$$

где суммирование распространяется на все ребра решетки. Статистическая сумма имеет вид

$$Z = \sum \exp\left\{\frac{J_p}{kT} \sum_{(i,j)} \delta(\sigma_i, \sigma_j)\right\}.$$

Точных результатов для модели Поттса существует немного. Известно, что если число спиновых состояний в модели Поттса больше некоторого критического значения (зависящего от размерности решетки) наблюдается фазовый переход первого рода, а если меньше – второго рода. Существуют материалы, такие как $\mathrm{SrTiO_2}$, структурные фазовые переходы в которых относятся к классу универсальности модели Поттса с тремя состояниями. Кроме того, модель Поттса является основой теоретического описания сложных анизотропных ферромагнетиков кубической структуры, многокомпонентных сплавов и жидких смесей.

В параграфе 5.2 построено точное решение модели Поттса с тремя состояниями на решетке Бете с произвольным координационным числом методом самосогласованных уравнений. Метод самосогласованных уравнений позволяет строить различные приближенные решения для модели Изинга как чистого, так и разбавленного магнетиков. Этим же методом можно строить и приближенные решения для модели Поттса основываясь на том, что модель Поттса с тремя состояниями можно рассматривать как частный случай модели Изинга с подвижными немагнитными примесями. Оказывается, что одно из таких решений можно интерпретировать как точное решение модели Поттса с тремя состояниями на решетке Бете. Для этого случая найдена температура фазового перехода, температурная зависимость параметра порядка, парная корреляционную функцию и корреляционная длина как функця температуры.

В отличие от модели Изинга, модель Поттса с числом состояний не меньше трех имеет фазовые переходы и в ненулевом внешнем поле. Точки этих фазовых переходов первого рода образуют на плоскости температура – внешнее поле линию, которая заканчивается точкой фазового перехода второго рода. Влияние немагнитного разбавления на критическое поведение модели Поттса в нулевом внешнем поле рассматривалось и ранее, однако исследования влияния немагнитного разбавления на всю линию фазовых переходов первого рода, насколько нам известно, ранее не проводилось.

В параграфе 5.3 рассматривается модель Поттса с произвольным числом состояний во внешнем поле и с немагнитным разбавлением методом среднего поля. Используется как «классический метод» среднего поля, так и его модификация, позволяющую более точно учитывать влияние немагнитного разбавления. Кроме того к модели Поттса разбавленного магнетика применяется метод усреднения по локальным полям межатомного взаимодействия. Получено самосогласованное уравнение для определения намагниченности и уравнение для расчета температуры фазового перехода. Для решеток с координационными числами 3 и 4 найдена спонтанная намагниченность как функция температуры и концентрации магнитных атомов для различных значений числа состояний спина.

В параграфе 5.4 получено решение для модели Поттса на решетке Бете с подвижными немагнитными примесями. Использован метод «псевдохаотического» распределения примесей, основанный на обращении в ноль корреляции в расположении атомов примеси для ближайших узлов. Для псевдохаотического распределения примесей найдена температура фазового перехода, намагниченность и величина скачка спонтанной намагниченности при температуре фазового перехода. Показано, что псевдохаотическое распределение примесей имеет ряд свойств, аналогичных вмороженным примесям. Установлено, что при псевдохаотическом распределении примесей фазовый переход в модели Поттса на решетке Бете остается переходом первого рода, но величина скачка намагниченности уменьшается при увеличении концентрации немагнитных примесей.

В этом же параграфе рассмотрена модель Поттса с немагнитным разбавлением (по узлам) и с произвольным числом состояний на решетке Бете во внешнем поле. В отличии от метода среднего поля (параграф 5.3), в решении задачи в псевдохаотическом приближении присутствует, как будет показано, перколяционный переход при ненулевом значении концентрации магнитных атомов.

Глава 6 В приближенных методах, предложенных и исследованных в предыдущих главах работы, рассматривались кластеры различного размера, выделяемые на решетке. Было показано, что если рассматриваемые кластеры не содержат замкнутых путей, полученные с их помощью приближения являются тем или иным обобщенным вариантом приближения Бете, что согласуется с тем, что приближение Бете можно рассматривать как точное решение на решетке без замкнутых путей (дереве Кейли). В главе 6 рассмотрено применение циклических кластеров для анализа свойств модели Изинга разбавленного магнетика, то есть кластеров, содержащих замкнутый путь. С помощь этого метода можно построить приближенные концентрационные зависимости намагниченности, критической температуры и найти приближенные значения порогов протекания по узлам и по связям. Полученные таким путем результаты являются, как показано в параграфе 6.2, более точными, чем получаемые методом Бете или его модификациями.

В параграфе 6.3 методом составления самосогласованных уравнений построен класс приближенных решений задачи Изинга, являющийся обобщением приближения Бете. Показано, что некоторые из приближений этого класса можно интерпретировать как точные решения для модели Изинга на рекурсивных решетках. Для этих рекурсивных решеток найдены точные значения порогов протекания по узлам и связям и показано, что для модели Изинга разбавленного магнетика метод приводит к точным значениям для этих порогов.

В параграфе 6.4 предложена интерпретация приближения Бете, основанная на методе усреднения по локальным обменным полям с учетом корреляции соседних спинов. На основе этой интерпретации построен приближенный метод анализа изинговских магнетиков с немагнитным разбавлением. В рассмотренном приближении вычислены перколяционные пороги и зависимости температуры Кюри от концентрации магнитных атомов для решеток с различными координационными числами.

Как правило, в теоретических исследованиях критического поведения магнетиков используется модель Изинга – модель с максимально простым гамильтонианом. Это объясняется гипотезой универсальности, согласно которой это критическое поведение определяется только симметрией гамильтониана системы и не зависит от его деталей. То есть, одно и то же критическое поведение (например, критические показатели) характерно не для каждого конкретного гамильтониана, а относится к целому классу гамильтонианов с одинаковой симметрией. Однако гипотеза универсальности сама по себе не содержит способов определения того, к какому классу универсальности принадлежит каждый конкретный гамильтониан. Поэтому, не лишено смысла и рассмотрение более сложных решеточных моделей, таких, как модель Гейзенберга.

В параграфе 6.5 рассмотрена модель Гейзенберга с тремя состояниями на решетке Бете. Задача заключается в нахождении равновесных вероятностей этих состояний при заданной температуре и внешнем поле. Эта задача может быть решена точно с помощью составления системы рекуррентных уравнений, что и проделано в этом параграфе. Однако главная цель заключалась даже не в решении самой задачи для модели Гейзенберга. В отношении модели Изинга известно, что ее решение на решетке Бете может быть интерпретировано как ренормгрупповое преобразование фиксированного масштаба в постоянном эффективном поле. В параграфе 6.5 была исследована возможность аналогичной интерпретации для модели Гейзенберга. Оказалось, что она невозможна для исходной модели Гейзенберга, но оказывается возможной для модели с более общим видом гамильтониана, а модель Гейзенберга получается из него предельным переходом.

В параграфе 6.6 построено самосогласованное приближение для вычисления намагниченности и температуры Кюри в модели Изинга на произвольной решетке, основанное на использовании намагниченности и парной корреляции ближайших соседей. В этом приближении найдены температуры Кюри для простых решеток. Приближение обобщено на случай разбавленных по узлам или связям решеток, для которых найдены приближенные значения порогов протекания.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы. Они заключаются в следующем.

1. Теоретически обоснован и обобщен метод усреднения по локальным полям взаимодействия. Доказано, что в системе взаимодействующих частиц любое термодинамическое среднее некоторой величины всегда может быть вычислено в два этапа. На первом этапе величина вычисляется по кластеру частиц, при фиксированном внешнем окружении. На втором – производится усреднение по конфигурациям этого окружения.

На основе такого представления термодинамических средних построена общая схема получения самосогласованных уравнений, включающая в себя как известные способы (метод среднего поля, приближение Бете, метод усреднения по обменным полям), так новые. Построение самосогласованных уравнений возможно двумя путями. Во-первых, вычисление термодинамических средних для кластера взаимодействующих спинов можно проделать с помощью функции распределения по обменным полям, выраженной через эти же средние. Во-вторых, можно, задав два различных кластера, найти среднее одной и той же величины с помощью функций распределения полей, выраженных через один и тот же параметр, который не имеет в этом случае смысла какой-либо термодинамической средней. Проведенный анализ показал, что между этими подходами нет принципиального различия – один и тот же результат может быть получен в разных подходах.

2. Решена одномерная модель Изинга с неподвижными случайно распределенными немагнитными примесями и одномерная модель Изинга с подвижными немагнитными примесями. Для второй модели найдены корреляционные функции. Показано, что с помощью подбора параметров межатомного взаимодействия, систему с подвижными примесями, находящимися в термодинамическом равновесии, можно приблизить к системе с вмороженными примесями (псевдохаотическое приближение).

Полученное точное решение для одномерной модели Изинга с разбавлением сравнивается с несколькими приближенными решениями. Для сравнения были рассмотрены следующие приближенные методы: метод среднего поля, метод усреднения по обменным полям как с учетом, так и без учета корреляций и псевдохаотическое приближение. Наиболее грубым, как и следовало ожидать, оказывается метод среднего поля. Решения, полученные по методу усреднения по обменным полям, особенно с учетом корреляции, гораздо лучше согласуются с точным решением. Но наиболее близким к точному решению оказывается решение, полученное в псевдохаотическом приближении. Причем это приближение превосходит остальные приближения по точности во всем диапазоне концентраций магнитных атомов.

3. В диссертационной работе развит следующий подход к анализу свойств разбавленных магнетиков с вмороженными немагнитными примесями. Вместо того чтобы с самого начала полагать, что примеси распределены в решетке случайно, рассматривается магнетик, в котором магнитные атомы и атомы примеси могут перемещаться и находятся в термодинамическом равновесии. Энергия такой системы определяется не только ориентацией магнитных моментов, но и расположением атомов примеси по узлам решетки. Иными словами, гамильтониан той или иной модели магнетика с подвижными примесями будет состоять из слагаемых, связанных с обменным взаимодействием магнитных атомов и слагаемых, связанных с межатомным взаимодействием в кристаллической решетке, причем равновесное распределение атомов примеси зависит от параметров, характеризующих эти взаимодействия. Тогда для каждого значения температуры, внешнего магнитного поля и концентрации (доли) магнитных атомов в системе можно подобрать значения параметров межатомного взаимодействия с таким расчетом, чтобы равновесное распределение атомов примеси было бы как можно ближе к случайному.

В работе рассматривается следующая реализация этой схемы. Рассмотрена модель Изинга на решетке с координационным числом q, причем часть магнитных атомов замещена атомами примеси, которые могут перемещаться по узлам решетки. Для этой модели исследованы фазовые состояния, найдена зависимость намагниченность от концентрации магнитных атомов и предельные значения концентраций при которых исчезает спонтанная намагниченность. Для такой модели можно определить несколько типов корреляционных функций – характеризующих взаимосвязь магнитных моментов и взаимосвязь расположения атомов примеси. В качестве условия близости распределения атомов примеси по узлам решетки к случайному, используется равенство нулю корреляции в расположении атомов примеси для двух ближайших узлов, что и является основой псевдохаотического приближения. В этом приближении найдена намагниченность как функция температуры и концентрации магнитных атомов, температура Кюри и перколяционные пороги.

5. Получено решение для модели Поттса на решетке Бете с подвижными немагнитными примесями. Использован метод псевдохаотического распределения примесей,

основанный на обращении в ноль корреляции в расположении атомов примеси для ближайших узлов. Для псевдохаотического распределения примесей найдена температура фазового перехода, намагниченность и величина скачка спонтанной намагниченности при температуре фазового перехода. Показано, что псевдохаотическое распределение примесей имеет ряд свойств, аналогичных вмороженным примесям. Установлено, что при псевдохаотическом распределении примесей фазовый переход в модели Поттса на решетке Бете остается переходом первого рода, но величина скачка намагниченности уменьшается при увеличении концентрации немагнитных примесей. Так же рассмотрена модель Поттса с немагнитным разбавлением и с произвольным числом состояний на решетке Бете во внешнем поле. С помощью метода псевдохаотического распределения примесей получена система уравнений для определения кривой фазовых переходов первого рода на плоскости «температура – внешнее поле». Найдена зависимость от концентрации магнитных атомов конечной точки линии фазовых переходов.

6. Методом составления самосогласованных уравнений построен класс приближенных решений задачи Изинга, являющийся обобщением приближения Бете. Показано, что некоторые из приближений этого класса можно интерпретировать как точные решения для модели Изинга на рекурсивных решетках. Для этих рекурсивных решеток найдены точные значения порогов протекания по узлам и связям и показано, что для модели Изинга разбавленного магнетика метод приводит к точным значениям для этих порогов.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1.Белоконь В.И., **Семкин С.В**. Метод случайного поля в модели Изинга разбавленного ферромагнетика // **ЖЭТФ**, 1992, т. 102, вып 4(10), с 1254 – 1258.

2. В.И. Белоконь, **С.В. Семкин**, Метод случайного поля в теории ферромагнетизма бинарных сплавов // **ЖЭТФ** 1993, т. 104 вып. 11, с. 3784 -3791.

3. В.И. Белоконь, Н.Н. Гусаков, **С.В. Семкин**, И.В.Соппа, «К вопросу об образовании химической намагниченности» **- Геофизический журнал**, т. 14, № 3, 1992.

4. В.И. Белоконь, **С.В. Семкин**, «Магнитные свойства и химическая намагниченность систем взаимодействующих частиц разбавленного ферромагнетика» - **Физика Земли**, 1994, № 1, с. 1-6,

5. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Использование метода усреднения по полям взаимодействия для построения ренормгруппового преобразования фиксированного масштаба // **Физика твердого тела**, 2013, т. 55, вып. 5, с. 892 – 895 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Method of Averaging over Interaction Fields for Constructing the Fixed_Scale Renormalization Group Transformation, **Physics of the Solid State**, 2013, Vol. 55, No. 5, pp. 970–973)

6. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Методы получения самосогласованных уравнений для изинговского магнетика // **Известия вузов.Физика, 2013,** т. 56, вып. 2, с. 9 – 14 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Methods of derivation of self-consistent equations for an Ising magnet, **Russian physics journal**, 2013, Vol. 56, No. 2, pp. 118-124.)

7. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Модель Изинга разбавленного ферромагнетика в приближении самосогласованного поля, **Физика твердого тела**, 2014, т. 56, вып. 6, с. 1064 – 1068 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Ising Model of a Dilute Ferromagnetin the Self-Consistent Field Approximation, **Physics of the Solid State**, 2014, Vol. 56, No. 6, pp. 1105–1109).

8. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Корреляционные функции чистого и разбавленного изинговского магнетика в приближении эффективного поля, **Физика твердого тела**, 2014, т. 56, вып. 7, с. 1288 – 129 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Correlation Functions of Pure and Diluted Ising Magnets in the Mean_Field Approximation **Physics of the Solid State**, 2014, Vol. 56, No. 7, pp. 1338–1341)

9. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Применение метода среднего поля к модели Изинга с подвижными примесями и к модели Поттса с тремя состояниями, **Физика твердого тела**, 2014, т. 56, вып. 12, с. 2341 – 2345 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Mean Field Theory as Applied to

the Ising Model with Mobile Impurities and to the Three State Potts Model, **Physics of the Solid State**, 2014, Vol. 56, No. 12, pp. 2425–2429)

10. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, «Самосогласованные уравнения в модели Изинга разбавленного магнетика», **Известия вузов.Физика**, 2014, т. 57, вып. 10, с. 54 – 60 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Self-consistent equations in the Ising model of a dilute magnet, **Russian physics journal**, 2015, Vol. 57, No. 10, pp. 1356 - 1363)

11. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Модель Поттса на решетке Бете с немагнитными примесями, **ЖЭТФ**, 2015, т.148, вып.4(10), с. 729-733 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, The Potts Model on a Bethe Lattice with Nonmagnetic Impurities, **Journal of Experimental and Theoretical Physics**, 2015, Vol. 121, No 4, pp. 636-639)

12. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Приближение Бете в модели Изинга с подвижными примесями, **Физика твердого тела**, 2015, т. 57, вып. 5, с. 926 – 931 (S.V. Semkin, V. P. Smagin, Bethe Approximation in the Ising Model with Mobile Impurities, Physics of the Solid State, 2015, Vol. 57, No. 5, pp. 943–948)

13. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Разбавленный изинговский магнетик на решетке Бете, **Известия вузов.Физика, 2015,** т. 58, вып. 12, с. 159 – 167 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Diluted Ising Magnet on the Bethe Lattice, **Russian physics journal**, 2016, Vol. 58, No. 12, pp. 1848 – 1858)

14. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Приближение среднего поля для модели Поттса разбавленного магнетика во внешнем поле, Физика твердого тела, 2016, т. 58, вып. 7, с. 1306 – 1310 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Mean-Field Approximation for the Potts Model of a Diluted Magnet in the External Field, **Physics of the Solid State**, 2016, Vol. 58, No. 7, pp. 1350 –1354)

15. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Исследование модели Поттса разбавленного магнетика методом усреднения по локальным полям, Физика твердого тела, 2016, т. 58, вып. 8, с. 1534 – 1536 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Investigation of the Potts Model of a Diluted Magnet by Local Field Averaging Technique, **Physics of the Solid State**, 2016, Vol. 58, No. 8, pp. 1587 –1589)

16. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Модель Поттса на решетке Бете во внешнем поле, **Известия вузов.Физика, 2016,** т. 59, вып. 10, с. 120 – 125 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, The Potts Model on a Bethe Lattice in an External Field, **Russian physics journal**, 2017, Vol. 59, No. 10, pp. 1656 – 1662)

17. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, «Кластерный способ построения приближения Бете для модели Изинга разбавленного магнетика», **Известия вузов.Физика**, 2017, т. 60, вып. 10, с. 140 – 145 (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, Cluster Method of Constructing Bethe Approximation

for the Ising Model of a Dilute Magnet, **Russian physics journal**, 2018, Vol. 60, No. 10, pp. 1803 – 1810)

18. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Е. Г. Гусев, «Модель Поттса на решетке Бете с немагнитными примесями во внешнем поле», **ТМФ**, 197:2 (2018), 290–295 (**S.V. Sjomkin**, V.P. Smagin, E.G. Gusev, «Potts Model on Bethe Lattice with Nonmagnetic Impurities in an External Magnetic Field» **Theoretical and Mathematical Physics** 197:2 (2018), 1645–1649)

19. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, «Приближение Бете для чистого и разбавленного магнетика как усреднение по локальным обменным полям», **Известия вузов.Физика, 2019,** т. 62, вып. 1, с. 153 – 158. (**S.V. Semkin**, V. P. Smagin, « Bethe Approximation for Pure and Diluted Magnets as Averaging over Local Exchange Fields» , **Russian physics journal**, 2019, Vol. 62, No. 1, pp. 172 – 178)

20. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Е. Г. Гусев, «Магнитная восприимчивость разбавленного изинговского магнетика» **ТМФ**, 2019, Т. 201, No. 2, С. 280-290 (S.V. Semkin, V.P. Smagin, E.G. Gusev, «Magnetic susceptibility of a diluted Ising magnet» **Theoretical and Mathematical Physics** 201:2 (2019), 1653–1661)

21. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, Е. Г. Гусев, «Модель Изинга с немагнитным разбавлением на рекурсивных решетках» **ТМФ**, 2020, Т. 202, No. 2, С. 304-311 (**S.V. Semkin**, V.P. Smagin, E.G. Gusev, «Ising model with nonmagnetic dilution on recursive lattices» **Theoretical and Mathematical Physics** 202:2 (2020), 265–271)

22. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, В.И. Люлько «Использование усреднения по полям взаимодействия для построения приближенных методов в модели Изинга разбавленного магнетика», **Физика твердого тела**, 2020, т. 62, вып. 8, с. 1209 – 1214 (**S. V. Semkin**, V. P. Smagin, and V. I. Lyul'ko «Construction of Approximate Methods within the Ising Model of a Diluted Magnet Using Averaging over Interaction Fields» **Physics of the Solid State**, 2020, Vol. 62, No. 8, pp. 1355 –1360)

23. **С.В. Сёмкин**, В.П. Смагин, П.В. Юдин «Самосогласованное приближение в модели Изинга чистого и разбавленного магнетика с использованием парной корреляции» **ТМФ**, 2020 2020, Т. 205, No. 1, С. 138-146
(**S. V. Semkin**, V. P. Smagin, P. V. Yudin «Self-consistent approximation in the Ising model of pure and dilute magnets using a pair correlation» **Theoretical and Mathematical Physics** 204:3 (2020), 1220–1227)

Другие публикации:

24. **С.В. Семкин**, «Исследование магнитных состояний неоднородных магнетиков методом усреднения по локальным обменным полям», Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук, Владивосток, 74 с., 1994.

25. **С.В. Семкин**, «Исследование магнитных состояний неоднородных магнетиков методом усреднения по локальным обменным полям» Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук, Владивосток, 1994

26. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, Приближенные методы в теории чистых и разбавленных магнетиков, монография, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса. – Владивосток: из-во ВГУЭС, 2019, - 220 с.

27. В.И. Белоконь, **С.В. Семкин**, И.В.Соппа, «Образование остаточной намагниченности в процессе роста спонтанной намагниченности продуктов реакции» - **Сб. «Химическая намагниченность. Теория и эксперимент»** изд-во ДВГУ, Владивосток, 1991

28. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, Метод среднего поля и метод усреднения по обменным полям для кластеров магнитных атомов // **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2012, № 3(16), с. 266-270.

29. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Одномерная цепочка изинговских спинов», **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2013, № 3(16), с. 266-270.

30. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Перколяционная кривая в приближении самосогласованного поля», **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2014, № 4(17), с. 233-237.

31. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Модель Поттса с тремя состояниями на решетке Бете», **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2015, № 4(31), с. 171-182.

32. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Одномерная модель Изинга с подвижными примесями», **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2016, № 2, с. 114-120.

33. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Модель Поттса на решетке Бете во внешнем поле», **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2016, № 3, с. 103-108.

34. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Приближенные методы исследования фазовых состояний в модели Поттса разбавленного магнетика», **Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса**, Владивосток 2017, т.9, № 2, с. 140-151.

35. В.П. Смагин, **С.В. Семкин**, «Метод циклических кластеров в модели Изинга разбавленного магнетика», **Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС**, Владивосток 2018, № 1, с. 116-123.

36. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Точное и приближенные решения для одномерной модели Изинга разбавленного магнетика», **Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС**, Владивосток 2018, № 4, с. 122-130.

37. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Модель Гейзенберга с тремя состояниями на решетке Бете», **Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС**, Владивосток 2019, № 1, с. 75-81.

38. В.П. Смагин, **С.В. Семкин**, «Рекуррентные решетки и самосогласованные уравнения в модели Изинга», **Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС**, Владивосток 2019, № 2, с. 139-149.

39. В.П. Смагин, **С.В. Семкин**, «Асимптотическое поведение восприимчивости и намагниченности разбавленного изинговского магнетика», **Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС,** Владивосток 2020, № 1, с. 105-114.

40. В.П. Смагин, **С.В. Семкин**, «Усреднение по полям взаимодействия и спиновые корреляции в модели Изинга», **Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС**, Владивосток 2020, № 2, с. 148-157.

41. В.И. Белоконь, **С.В. Семкин**, И.В.Соппа, «Химическая намагниченность продуктов превращения титаномаггемита при инверсиях поля» - **Тез. докл. IV Всесоюзного съезда по геомагнетизму**, часть 3, с. 7-8, Владимир-Суздаль, 1991

42. В.И. Белоконь, **С.В. Семкин**, «К теории ферромагнетизма бинарных сплавов» - **Тез. докл. XXXV Всероссийской межвузовской научно-технической конференции**. Владивосток. 1992

43. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Точное и приближенные решения для одномерной цепочки изинговских спинов» - **Материалы 56-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2013. Т.3, с. 276-279

44. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Приближение среднего поля в модели Поттса с тремя состояниями», **Материалы 57-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2014. Т.3, с. 174-176.

45. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Фазовые состояния разбавленного изинговского магнетика в приближении среднего поля», **Материалы 57-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2014. Т.3, с. 177-180.

46. С.В. Семкин, В.П. Смагин, «Цепочка изинговских спинов с подвижными примесями», **Материалы 57-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2014. Т.3, с. 181-183

47. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Усреднение по полям обменного взаимодействия в модели Поттса с произвольным числом состояний», **Материалы 58-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2015.

48. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Модель Поттса на решетке Бете с псевдохаотически распределенными немагнитными примесями», **Материалы 58-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2015.

49. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «К вопросу о влиянии кристаллической анизотропии на температуру Кюри», **Материалы 58-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2015.

50. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Метод усреднения по локальным обменным полям и метод Бете», **Материалы 59-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2016. Т., с. 225-227.

51. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Использование различных кластеров для получения самосогласованных уравнений в модели Изинга», **Материалы 59-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2016. Т., с. 228-230.

52. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Циклические кластеры в модели Изинга разбавленного магнетика», **Материалы 59-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2016. Т., с. 231-234.

53. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Оценка точности различных приближенных методов в модели Изинга разбавленного магнетика», **Материалы 60-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2017. Т. III, с. 182-185.

54. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Точное решение для одномерной модели Изинга с немагнитным разбавлением», **Материалы 60-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2017. Т. III, с. 186-189

55. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Модель Поттса на решетке Бете с немагнитным разбавлением», **Материалы 60-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2017. Т. III, с. 190-193

56. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Перколяционные пороги некоторых рекуррентных решеток», **Материалы 62-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2019. Т. III, с. 182 – 184

57. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Одномерная цепочка изинговских спинов с немагнитным разбавлением», **Материалы 62-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2019. Т. III, с. 185 - 187

58. **С.В. Семкин**, В.П. Смагин, «Рекурсивные решетки и самосогласованные уравнения в модели Изинга», **Материалы 62-й Всероссийской научной конференции**. Владивосток, 2019. Т. III, с. 188 - 191