

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.285.24,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА», МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 28.05.2019 г., № 6

**О присуждении Канторович Софье Сергеевне, гражданство Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.**

Диссертация «Микроструктурные и магнитные свойства феррожидкостей, феррогелей, анизотропных и анизометричных магнитных коллоидов» по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений принята к защите 25 февраля 2019 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом Д 212.285.24, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19; приказ Министерства образования и науки Российской Федерации о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Канторович Софья Сергеевна 1980 года рождения.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Цепочечные агрегаты в полидисперсных магнитных жидкостях» защитила в 2004 году в диссертационном совете, созданном на базе Уральского государственного университета им. А.М. Горького. В 2015 году окончила докторантуру ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента Российской Федерации Б.Н.Ельцина» по специальности

01.01.03 – математическая физика; работает в должности доцента-исследователя кафедры теоретической и математической физики Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре теоретической и математической физики Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор *Иванов Алексей Олегович*, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», заместитель проректора по науке, Институт естественных наук и математики, кафедра теоретической и математической физики, профессор.

#### **Официальные оппоненты:**

*Авдеев Михаил Васильевич*, доктор физико-математических наук, международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна), лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, сектор нейтронной оптики, начальник сектора;

*Комогорцев Сергей Викторович*, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт Физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск), лаборатория физики магнитных пленок, старший научный сотрудник;

*Ерин Константин Валерьевич*, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь), кафедра общей и теоретической физики, профессор.

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация**, *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»*, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Перовым Николаем Сергеевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой магнетизма и Грановским Александром Борисовичем, доктором физико-математических наук, профессором кафедры магнетизма, указала, что «Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой завершенную, научно-квалификационную работу, вносящую заметный вклад в развитие актуального научного направления, связанного с исследованием композитных магнитореологических материалов. Новые научные результаты, полученные диссертанткой, существенно расширили представления о магнитных структурах, реализующихся в магнитореологических средах. Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы позволяют оценить перспективность данного направления в качестве нового подхода к изучению композитных магнитореологических материалов. Выводы работы обоснованы. Автореферат и публикации по теме диссертации полностью отражают ее содержание. Диссертация полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Канторович Софья Сергеевна - заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01. 04. 11 - физика магнитных явлений».

Соискатель имеет 80 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 40 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 40 работ.

Общий объем работ, опубликованных по теме диссертации, составляет 22,3 п.л. / 7,63 п.л. – авторский вклад соискателя. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

**Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:**

1. P. A. Sanchez, E. S. Minina, **S. S. Kantorovich**, and E. Y. Kramarenko, «Surface relief of magnetoactive elastomeric films in a homogeneous magnetic field: molecular dynamics simulations», *Soft Matter*, vol. 15, pp 175–189, 2019; 0.94 п.л./0.25 п.л. (WOS, Scopus);

2. E. S. Minina, P. A. Sanchez, C. N. Likos, and **S. S. Kantorovich**, «The influence of the magnetic filler concentration on the properties of a microgel particle: Zero-field case», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 459, pp. 226–230, 2018; 0.3 п.л./0.1 п.л. (WOS, Scopus);

3. E. S. Minina, E. S. Pyanzina, E. Novak, V, and **S. S. Kantorovich**, «Compressibility of ferrofluids: Towards a better understanding of structural properties», *European Physical Journal E*, vol. 41, p. 67, 2018; 0.44 п.л./0.11 п.л. (WOS, Scopus);

4. E. S. Minina, R. Blaak, and **S. S. Kantorovich**, «Pressure and compressibility factor of bidisperse magnetic fluids», *Journal of Physics-Condensed Matter*, vol. 30, p. 145101, 2018; 0.69 п.л./0.33 п.л. (WOS, Scopus);

5. P. A. Sanchez, T. Gundermann, A. Dobroserdova, **S. S. Kantorovich**, and S. Odenbach, «Importance of matrix inelastic deformations in the initial response of magnetic elastomers», *Soft Matter*, vol. 14, pp. 2170–2183, 2018; 0.86 п.л./0.2 п.л. (WOS, Scopus);

6. L. Rossi, J. G. Donaldson, J.-M. Meijer, A. V. Petukhov, D. Kleckner, **S. S. Kantorovich**, W. T. M. Irvine, A. P. Philipse, and S. Sacanna, «Self-organization in

dipolar cube fluids constrained by competing anisotropies», *Soft Matter*, vol. 14, pp. 1080–1087, 2018; 0.5 п.л./0.05 п.л. (WOS, Scopus);

7. M. Ronti, L. Rovigatti, J. M. Tavares, A. O. Ivanov, **S. S. Kantorovich**, and F. Sciortino, «Free energy calculations for rings and chains formed by dipolar hard spheres», *Soft Matter*, vol. 13, pp. 7870–7878, 2017; 0.56 п.л./0.08 п.л. (WOS, Scopus);

8. J. G. Donaldson, E. S. Pyanzina, and **S. S. Kantorovich**, «Nanoparticle Shape Influences the Magnetic Response of Ferro-Colloids», *ACS Nano*, vol. 11, pp. 8153–8166, 2017; 0.88 п.л./0.3 п.л. (WOS, Scopus);

9. E. S. Pyanzina, A. V. Gudkova, J. G. Donaldson, and **S. S. Kantorovich**, «Cluster analysis in systems of magnetic spheres and cubes», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 431, pp. 201–204, 2017; 0.25 п.л./0.06 п.л. (WOS, Scopus);

10. E. V. Novak and **S. S. Kantorovich**, «Self-assembly of colloids with magnetic caps», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 431, pp. 214–217, 2017; 0.25 п.л./0.12 п.л. (WOS, Scopus);

11. J. G. Donaldson, P. Linse, and **S. S. Kantorovich**, «How cube-like must magnetic nanoparticles be to modify their self-assembly?», *Nanoscale*, vol. 9, pp. 6448–6462, 2017; 0.94 п.л./0.35 п.л. (WOS, Scopus);

12. **S. S. Kantorovich** and A. O. Ivanov, «The influence of self-assembly on the magnetic response of dipolar soft systems», vol. 193 of *Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi*, pp. 137–163, 2016; 1.75 п.л./0.9 п.л. (WOS, Scopus);

13. G. Steinbach, D. Nissen, M. Albrecht, E. V. Novak, P. A. Sanchez, **S. S. Kantorovich**, S. Gemming, and A. Erbe, «Bistable self-assembly in homogeneous colloidal systems for flexible modular architectures», *Soft Matter*, vol. 12, no. 10, pp. 2737–2743, 2016; 0.5 п.л./0.1 п.л. (WOS, Scopus);

14. R. Weeber, **S. Kantorovich**, and C. Holm, «Ferrogels cross-linked by magnetic particles: Field-driven deformation and elasticity studied using computer simulations», *Journal of Chemical Physics*, vol. 143, p. 154901, 2015; 0.75 п.л./0.3 п.л. (WOS, Scopus);

15. E. V. Novak, E. S. Pyanzina, and **S. S. Kantorovich**, «Behaviour of magnetic Janus-like colloids», *Journal of Physics-Condensed Matter*, vol. 27, p. 234102, 2015; 0.6 п.л./0.25 п.л. (WOS, Scopus);
16. R. Weeber, **S. Kantorovich**, and C. Holm, «Ferrogels cross-linked by magnetic nanoparticles Deformation mechanisms in two and three dimensions studied by means of computer simulations», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 383, pp. 262–266, 2015; 0.3 п.л./0.15 п.л. (WOS, Scopus);
17. J. G. Donaldson, E. S. Pyanzina, E. V. Novak, and **S. S. Kantorovich**, «Anisometric and anisotropic magnetic colloids: How to tune the response», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 383, pp. 267–271, 2015; 0.3 п.л./0.07 п.л. (WOS, Scopus).
18. A. O. Ivanov, **S. S. Kantorovich**, L. Rovigatti, J. M. Tavares, and F. Sciortino, «Low temperature structural transitions in dipolar hard spheres: The influence on magnetic properties», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 383, pp. 272–276, 2015; 0.3 п.л./0.1 п.л. (WOS, Scopus);
19. **S. S. Kantorovich**, A. O. Ivanov, L. Rovigatti, J. M. Tavares, and F. Sciortino, «Temperature induced structural transitions in self-assembling magnetic nanocolloids», *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 17, no. 25, pp. 16601–16608, 2015; 0.5 п.л./0.1 п.л. (WOS, Scopus);
20. J. G. Donaldson and **S. S. Kantorovich**, «Directional self-assembly of permanently magnetised nanocubes in quasi two-dimensional layers», *Nanoscale*, vol. 7, no. 7, pp. 3217–3228, 2015; 0.75 п.л./0.37 п.л. (WOS, Scopus);
21. R. Weeber, M. Klinkigt, **S. Kantorovich**, and C. Holm, «Microstructure and magnetic properties of magnetic fluids consisting of shifted dipole particles under the influence of an external magnetic field», *Journal of Chemical Physics*, vol. 139, p. 214901, 2013; 0.8 п.л./0.25 п.л. (WOS, Scopus).
22. L. Rovigatti, **S. Kantorovich**, A. O. Ivanov, J. M. Tavares, and F. Sciortino, «Branching points in the low-temperature dipolar hard sphere fluid», *Journal of Chemical Physics*, vol. 139, p. 134901, 2013; 0.6 п.л./0.2 п.л. (WOS, Scopus);

23. E. Minina and **S. Kantorovich**, «The influence of dimensionality on the behavior of magnetic dipolar soft spheres: calculation of the pressure», Journal of Physics-Condensed Matter, vol. 25, p. 155102, 2013; 0.5 п.л./0.25 п.л. (WOS, Scopus);

24. **S. Kantorovich**, A. O. Ivanov, L. Rovigatti, J. M. Tavares, and F. Sciortino, «Nonmonotonic Magnetic Susceptibility of Dipolar Hard-Spheres at Low Temperature and Density», Physical Review Letters, vol. 110, p. 148306, 2013; 0.3 п.л./0.1 п.л. (WOS, Scopus);

25. Минина Е.С., Муратова А.Б., Серда Дж., **Канторович С.С.** “Микроструктура бидисперсной феррожидкости в тонком слое”, ЖЭТФ, Т. 143, С. 486-506, 2013; 1.3 п.л./0.35 п.л. (WOS, Scopus).

**На автореферат диссертации поступили положительные отзывы от:**

*Раїхера Юрия Львовича*, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего Лабораторией физики и механики мягкого вещества ФГБУН Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь). Отзыв не содержит замечаний и вопросов.

*Бириштейн Татьяны Максимовны*, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника лаборатории теории и моделирования полимерных систем ФГБУН Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук (г. Санкт-Петербург). Отзыв не содержит замечаний и вопросов.

*Казакова Юрия Борисовича*, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой электромеханики, научного руководителя проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики ФГБОУ ВО “Ивановский государственный энергетический университет им В.И. Ленина” (г. Иваново). В отзыве содержится следующее замечание: «не использованы уравнения математической физики Максвелла, описывающие электромагнитные процессы».

*Полунина Вячеслава Михайловича*, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск). В отзыве отмечен следующий недостаток: «При описании Главы 5 (стр. 25-28) практически нет количественных данных, подтверждающих приводимые выводы».

*Скрябина Юрия Николаевича*, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника Лаборатории нейтронных исследований вещества ФГБУН Институт физики металлов имени И.М. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург). В отзыве приведен следующий комментарий: «...было бы интересно дополнить данные автора нейтронографическими исследованиями микроструктуры изучаемых систем, т.е. методом, способным давать эффективные сведения о ближнем порядке в материалах».

*Бердинского Виталия Львовича*, доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой биофизики и физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (г. Оренбург). Отзыв не содержит замечаний и вопросов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и достижениями в области физики магнитных явлений, наличием аналитических работ цитируемых публикаций с результатами исследования магнитных материалов и способностью определить научную и практическую значимость диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**Разработаны** теоретическая модель и численные методы, позволяющие изучить поведение монодисперсной и бидисперсной магнитных жидкостей монослоя. В сравнении с объемным образцом система в квази 2D оказывается менее заагрегированной, но при этом в ней наблюдается большее разнообразие топологий кластеров. Причиной является изменение как энтропии, так и конфигурационных интегралов кластеров.



**Сформулирована** концепция иерархических структурных переходов в монодисперсных магнитных коллоидах при охлаждении и повышении концентрации магнитного материала. Показана ошибочность научного представления о том, что наиболее типичными для дипольных твердых сфер должны оказаться Y-структуры. В действительности, доминирующими являются X-структуры как обладающие более высокой энтропией. А при понижении температуры X-сочленения объединяют энергетически выгодные кольца, образуя сетки.

Теоретически **обнаружена** немонотонная зависимость начальной магнитной восприимчивости монодисперсного магнитного коллоида при понижении температуры; этот эффект подтвержден результатами компьютерного моделирования микроструктуры феррожидкостей методом молекулярной динамики; данный эффект также наблюдается в экспериментах, проведенных в ИМСС УрО РАН, г. Пермь. Показано, что рост начальной магнитной восприимчивости при увеличении интенсивности дипольного взаимодействия и/или понижении температуры ограничен точкой фазового пространства, в которой происходит смена доминирующей структурной единицы: магнито-активные линейные цепочки вытесняются магнито-инертными кольцевидными агрегатами частиц с суммарным нулевым магнитным моментом.

**Показано**, что ориентация магнитного момента относительно кристаллографических осей кубической магнитной частицы определяет самоорганизацию в ансамбле таких частиц: для магнитных кубических частиц с ориентацией магнитного момента вдоль кристаллографической оси 001 показано, что линейные цепочечные агрегаты с диполями "голова-хвост" являются единственной структурой основного состояния. При скруглении углов кубических частиц **выявлено**, что чем ближе форма частицы к идеальному кубу, тем больше частиц требуется для того, чтобы цепочка из них свернулась в кольцо в основном состоянии. Переход от цепочки к кольцу в основном состоянии имеет промежуточную конфигурацию -- кольцо с изломами. Для кубических частиц с направлением дипольных моментов вдоль оси 111 в основном состоянии

образуются решетки, элементарная ячейка которых состоит из четырех кубов, моменты которых образуют замкнутое зигзагообразное кольцо. **Обнаружено**, что начальная восприимчивость коллоида с кубическими частицами, магнитный момент которых направлен по оси 001, растет медленнее с понижением температуры, чем для аналогичного коллоида со сферическими частицами. Степень заагрегированности понижается с ростом кубичности частиц, так как объем фазового пространства, в котором две кубические частицы могут образовать устойчивую связь, оказывается существенно меньше, чем для сферических частиц. Однако, несмотря на то, что магнитный отклик системы кубических частиц с ориентацией магнитного момента 001 ниже, чем у сферических частиц, рост начальной восприимчивости для этих систем не блокируется формированием структур с замкнутым магнитным моментом в диапазоне температур, достижимых на сегодняшний день без изменения жидких свойств носителя. **Показано**, что направление магнитного момента внутри гематитовых кубов является решающим фактором в формировании структур определенной топологии в поле произвольной напряженности. Анализ нескольких близких ориентаций дипольных моментов позволил установить, что экспериментально наблюдаемое формирование изломов в цепочках в сильном магнитном поле имеет энтропийную природу и также определяется скруглением углов кубических частиц.

**Впервые построена** модель, описывающая самоорганизацию магнитных частиц Януса. Показано, что частичное магнитное покрытие из кобальта и палладия на поверхности коллоидов из диоксида кремния эквивалентно комбинации точечных диполей, смещенных от центра масс радиально к поверхности коллоида. Рассмотрены модели с одним, тремя и пятью смещенными диполями -- сд-частица, 3сд-частица и 5сд-частица. **Изучено** влияние магнитного поля, направленного как параллельно, так и перпендикулярно слою частиц Януса, на структурные переходы в рамках модельной системы, содержащей 5сд-частицы. Показано, что управляя амплитудой и направлением внешних полей, в слое магнитных частиц Януса можно индуцировать переходы от рыхлых сеток к

компактным кластерам, одиночным цепочкам с ориентацией покрытий "голова-хвост", вариативно компактными двойными цепочками и одиночными частицами.

**Выявлено**, что способ закрепления частиц внутри эластичной матрицы определяет характер деформаций геля в магнитном поле. Если магнитные частицы внедрены в полимерные цепи, создающие гелевую матрицу, то в приложенном магнитном поле образец будет растягиваться в направлении поля и сжиматься в обратном. Причем деформация будет тем больше, чем длиннее полимерные цепи. Если же магнитные частицы являются сшивками полимерной матрицы, то двумерный магнитный гель сжимается во всех направлениях, включая направление поля, а степень деформации увеличивается с уменьшением длины полимерных цепей, образующих гель. В трехмерных образцах магнитных гелей была **впервые обнаружена** анизотропия внутренних напряжений гелевой матрицы, связанная с тем, что частица может "безнаказанно" вращаться вокруг оси, сонаправленной с внешним полем, в то время как, вращения, приводящие к отклонению дипольного момента от внешнего магнитного поля приводят к увеличению энергии Зеемана. Показано, что увеличение числа цепочек, приходящихся на магнитную частицу, имеет два эффекта. С одной стороны, упругие напряжения в геле, вызванные переориентацией магнитных частиц во внешнем поле, возрастают. С другой -- большее количество полимерных цепочек приводит к локальному росту плотности частиц в модельном геле, что оказывает обратный эффект на степень сжатия. **Обнаружено**, что феррогели, построенные на базе простой кубической решетки, оказываются значительно более жесткими, чем их аналоги на базе алмазной кубической решетки. Также показано, что жесткость феррогеля растет с увеличением напряженности приложенного магнитного поля.

**Объяснен** микроструктурный механизм отклонения начальной петли намагничивания магнитного эластомера с магнитожесткими частицами от всех последующих. Для воспроизведения экспериментально наблюдаемого поведения необходимо, чтобы в системе эластичная матрица препятствовала как вращению, так и смещению частиц. Более того необходимо учесть, что при первой петле

намагничивания частицы могут необратимо локально разрушать матрицу, высвобождая необходимые для реакции на поле степени свободы. Данные выводы получили экспериментальное подтверждение при анализе томографических снимков магнитных эластомеров. **Разработана** модель тонкого покрытия из магнитного эластомера (МАЭ) на немагнитной твердой поверхности. **Выявлены** два режима реакции МАЭ на внешнее поле: при низких полях магнитные частицы стремятся в основном вращаться на месте, избегая больших поступательных смещений, и, таким образом, не вызывая сильных упругих деформаций матрицы; при увеличении поля частицы начинают формировать цепочки перпендикулярные подложке, что приводит к очень сильным упругим деформациям, особенно вблизи свободной поверхности покрытия. Наличие свободной поверхности приводит к тому, что магнитная восприимчивость становится немонотонной функцией приложенного магнитного поля, с максимумом, положение которого зависит от концентрации магнитных частиц и жесткости матрицы, но в любом случае соответствует напряженности поля, при которой дипольная и зеемановская энергии приблизительно совпадают. **Обнаружена** немонотонная зависимость шероховатости поверхности от концентрации магнитных частиц в МАЭ. Эта зависимость обусловлена тем, что шероховатость поверхности растет как с ростом вертикальных цепочек, образованных магнитными частицами при сильных полях, так и с горизонтальным расстоянием между ними.

#### **Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

Результатом диссертационной работы является универсальный подход к описанию мягких магнитных материалов, основанный на комбинации аналитических и численных методов. Универсальность этому подходу обеспечивает возможность масштабирования: для систем с магнитными частицами, обладающими собственной остаточной намагниченностью, будь они нано- или микронных размеров, решающую роль в структурно-фазовых переходах, а как следствие, в магнитном отклике систем на внешнее магнитное

поле, играет баланс между стерическими, упругими, дипольными и Зеемановскими силами, а в случае наночастиц -- еще и энтропией, в то время, как поправками на магнитные взаимодействия более высоких порядков (неоднородность намагниченности анизометричных или анизотропных коллоидов) можно пренебрегать для достаточно широкого класса мягких магнитных материалов на больших временах, в состояниях близких к термодинамическому равновесию или непосредственно в равновесии для широкого диапазона концентраций магнитного материала и температур. В заключении работа вносит вклад в разработку современных методов компьютерного моделирования и теоретического описания магнитных мягких материалов.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

полученные в диссертации результаты о структуре и свойствах магнитных мягких материалов позволяют усовершенствовать их синтез, более точно контролировать их отклик на внешнее магнитное поле. Последнее имеет решающее значение для промышленного и медицинского использования магнитных смарт-материалов. Также полученные результаты важны для прогнозирования различного рода магнито-механических эффектов в уже готовых феррожидкостях, суспензиях анизометричных и анизотропных магнитных частиц, а также в магнитных гелях и эластомерах.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Достоверность обеспечивается с одной стороны адекватностью физических представлений и моделей взаимодействий между магнитными частицами, с другой – их (полученных теоретических результатов) соответствием данным натуральных и компьютерных экспериментов, а также строгостью математических вычислений. Важно отметить, что выводы диссертации также согласуются с результатами исследований других ученых, работающих в области статистической физики, компьютерного моделирования и физики магнитных

явлений. Результаты исследований также согласуются между собой. Их достоверность подкрепляется систематическим характером исследований.

**Личный вклад соискателя:**

заклучался в постановке всех решенных задач, построении устойчивых моделей магнитных ансамблей на основе разработки оригинальных алгоритмов минимизации их свободной энергии, постановке компьютерных экспериментов для магнитных частиц Януса и анализе всех полученных результатов, подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертационная работа Канторович Софьи Сергеевны соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненной автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое научное направление в физике магнитных мягких материалов. Полученные в диссертационной работе результаты характеризуются высокой степенью новизны и практической значимостью для развития физики магнитных явлений.

На заседании 28 мая 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Канторович С.С. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 14 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 14, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель

диссертационного совета



Памятных Евгений Алексеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета



Овчинников Александр Сергеевич

28.05.2019 г.