

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 02.1.003.03 НА БАЗЕ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ» (ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ – ПРАВИТЕЛЬСТВО РФ) ПО ДИССЕРТАЦИИ  
КУЗНЕЦОВА НИКИТЫ МИХАЙЛОВИЧА «ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ:  
СОСТАВ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА» НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 06.02.2024, № 1

О присуждении КУЗНЕЦОВУ Никите Михайловичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Электрореологические жидкости: состав, структура, свойства» по специальности 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» принята к защите 18.10.2023, протокол № 2, диссертационным советом 02.1.003.03, созданным на базе федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), 123182 г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1 (утвержден Приказом Минобрнауки России № 105/нк от 11.04.2012 г.).

**Соискатель** Кузнецов Никита Михайлович, дата рождения: 14 июня 1993 года.

В 2015 году Кузнецов Н.М. окончил факультет естественных наук Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» по специальности 020101.65 «Химия». Диплом специалиста с отличием выдан 01.07.2015 г., номер 107718 0608735. В 2019 году окончил очную аспирантуру НИЦ «Курчатовский институт» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Диплом выдан 05.07.2019 г., номер 107724 3964393.

23 апреля 2019 года на заседании диссертационного совета Д 520.009.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Влияние формы неорганических нанонаполнителей на электрореологическое поведение полимерных жидкостей», специальность 01.04.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (диплом КАН № 004031).

Диссертационная работа Кузнецова Н.М. выполнена в Лаборатории полимерных материалов Отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий (КК НБИКС-пт) НИЦ «Курчатовский институт».

В период работы над диссертацией Кузнецов Н.М. работал в должностях инженера-исследователя, научного сотрудника и по настоящее время – старшего научного сотрудника, с 2022 года исполняет обязанности начальника Отдела нанобиоматериалов и структур КК НБИКС-пт.

**Научный консультант:** Чвалун Сергей Николаевич, член-корреспондент РАН, доктор химических наук по специальности 02.00.06 (1.4.7.) – «Высокомолекулярные соединения», профессор, главный научный сотрудник Отдела нанобиоматериалов и структур КК НБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

**Официальные оппоненты:**

- Крамаренко Елена Юльевна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики полимеров и кристаллов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва;

- Куличихин Валерий Григорьевич, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории реологии полимеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, г. Москва;

- Патлажан Станислав Абрамович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории физики и механики полимеров Отдела полимеров и композиционных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН), Московская обл., г. Черноголовка, в своем положительном заключении, подписанном доктором химических наук, заведующей лабораторией металлополимеров Джардималиевой Г.И., кандидатом физико-

математических наук, руководителем группы адаптивных материалов отдела полимеров и композиционных материалов Анохиным Д.В. и утвержденном доктором химических наук, заместителем директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН Бадамшиной Э.Р., указала, что представленная работа является актуальной и направлена на разработку подходов к целенаправленному управлению свойствами электрореологических жидкостей, что позволяет расширить область применения таких материалов и улучшить эксплуатационные характеристики существующих устройств.

Из наиболее важных научных результатов и достижений, обуславливающих научную новизну диссертационной работы, в отзыве ведущей организации отмечается:

- Разработка подходов к управлению свойствами электрочувствительных дисперсных систем, формулирование принципов создания низкоконцентрированных электрореологических жидкостей с контрастным изменением свойств под действием внешнего стимула.

- Установление основных закономерностей электрореологического эффекта суспензий на основе наполнителей различной природы: наноалмазов детонационного синтеза, склонных к формированию фрактальных структур, слоистых алюмосиликатов различной морфологии и модификации, а также полимерных частиц как с анизометрией формы, так и высокопористых, в том числе композиционных.

- Выявление влияния структурной организации наполнителя в дисперсии на электрореологические и седиментационные свойства жидкостей. Показано, что химическая природа поверхности частиц, обусловленная типом модификации, наряду с их формой, является важным фактором, определяющим как структурную организацию наполнителя в суспензии, так и электрофизические характеристики материала.

- Новый подход к повышению электрореологического отклика и седиментационной устойчивости жидкостей за счет изменения структуры частиц полимерных наполнителей с формированием надмолекулярного каркаса и создания наполнителей с направленно-измененной морфологией. Включение допантов в полимерные частицы с одной стороны приводит к изменению значений проводимости и диэлектрической проницаемости наполнителя, что находит отражение в изменении его электрореологического отклика, и сохранение высокопористой структуры с другой, обуславливает высокую седиментационную устойчивость и стабильность отклика жидкостей.

- Результаты диссертационной работы вносят вклад в развитие представлений о стабильности дисперсных систем и природе взаимодействия наночастиц на основе диэлектрических жидких сред, а также о механизме электрореологического эффекта.

В конце отзыва ведущей организации резюмируется: «Диссертационная работа Кузнецова Никиты Михайловича на тему «Электрореологические жидкости: состав, структура, свойства» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции, а ее автор Кузнецов Никита Михайлович заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17. – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.».

Соискатель имеет 62 публикации по теме диссертации, в том числе 20 статей в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых Web of Science, Scopus, РИНЦ и в действующем Перечне ВАК:

1. Stolyarova D.Yu., **Kuznetsov N.M.**, Belousov S.I., Chvalun S.N. Electrorheological behavior of low filled suspensions of highly anisometric montmorillonite particles // J. Appl. Polym. Sci. 2019. V. 136. P. 47678 (9).
2. Shvidchenko A.V., Eidelman E.D., Vul' A.Ya, **Kuznetsov N.M.**, Stolyarova D.Yu., Belousov S.I., Chvalun S.N. Colloids of detonation nanodiamond particles for advanced applications // Adv. Colloid Interface Sci. 2019. V. 268. P. 64-81.
3. **Кузнецов Н.М.**, Бакиров А.В., Белоусов С.И., Чвалун С.Н. Ориентация частиц слоистых алюмосиликатов с высоким характеристическим отношением под действием электрического поля в парафине // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 6. С. 663-667.
4. **Kuznetsov N.M.**, Belousov S.I., Bakirov A.V., Chvalun S.N., Kamyshinsky R.A., Mikhutkin A.A., Vasiliev A.L., Tolstoy P.M., Mazur A.S., Eidelman E.D., Yudina E.B., Vul A.Ya. Unique rheological behavior of detonation nanodiamond hydrosols: The nature of sol-gel transition // Carbon. 2020. V. 161. P. 486-494.
5. Vdovichenko A.Yu., **Kuznetsov N.M.**, Shevchenko V.G., Belousov S.I., Yudina E.B., Chvalun S.N. The role of charge states in the self-organization of detonation nanodiamonds nanoparticles // Diam. Relat. Mater. 2020. V. 107. P. 107903 (8).

6. Malakhova Yu. N., Stupnikov A.A., Chekusova V.P., **Kuznetsov N.M.**, Belousov S.I. Rheological behavior of polydimethylsiloxane Langmuir layers at the airwater interface // *BioNanoSci.* 2020. V. 10. P. 403–408.
7. **Кузнецов Н.М.**, Шевченко В.Г., Белоусов С.И., Чвалун С.Н. Диэлектрические свойства суспензий нанотрубок галлуазита в полидиметилсилоксане // *Журнал физической химии.* 2020. Т. 94, № 2. С. 259-264.
8. **Kuznetsov N.M.**, Zagoskin Y.D., Vdovichenko A.Yu, Bakirov A.V., Kamyshinsky R.A., Istomina A.P., Grigoriev T.E., Chvalun S.N. Enhanced electrorheological activity of porous chitosan particles // *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 256. P. 117530 (11).
9. **Kuznetsov N.M.**, Zagoskin Y.D., Bakirov A.V., Vdovichenko A.Yu., Malakhov S.N., Istomina A.P., Chvalun S.N. Is chitosan the promising candidate for filler in nature-friendly electrorheological fluids? // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2021. V. 9. P. 3802-3810.
10. Knizhnik A.A., Polynskaya Y.G., Sinitsa A.S., **Kuznetsov N.M.**, Belousov S.I., Chvalun S.N., Potapkin B.V. Analysis of structural organization and interaction mechanisms of detonation nanodiamond particles in hydrosols // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. V. 23. P. 674-682.
11. **Kuznetsov N.M.**, Belousov S.I., Kamyshinsky R.A., Vasiliev A.L., Chvalun S.N., Yudina E.B., Vul A.Ya. Detonation nanodiamonds dispersed in polydimethylsiloxane as a novel electrorheological fluid: Effect of nanodiamonds surface // *Carbon.* 2021. V. 174. P. 138-147.
12. **Kuznetsov N.M.**, Bakirov A.V., Banin E.P., Belousov S.I., Chvalun S.N. In situ X-ray analysis of montmorillonite suspensions in polydimethylsiloxane: Orientation in shear and electric field // *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2021. V. 622. P. 126663 (9).
13. **Кузнецов Н.М.**, Ковалева В.В., Загоскин Ю.Д., Вдовиченко А.Ю., Малахов С.Н., Ястремский Е.В., Камышинский Р.А., Григорьев Т.Е., Чвалун С.Н. Особенности применения композиционных пористых полимерных частиц в качестве наполнителей электрореологических жидкостей // *Российские нанотехнологии.* 2021. Т. 16, № 1. С. 125-132.
14. Sokolov M.A., **Kuznetsov N.M.**, Belousov S.I., Chvalun S.N. Effect of the dispersion medium viscosity on the electrorheological behavior of halloysite suspensions in polydimethylsiloxane // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64, № 11. P. 79-85.

15. Kovaleva V.V., **Kuznetsov N.M.**, Istomina A.P., Bogdanova O.I., Vdovichenko A.Yu., Streltsov D.R., Malakhov S.N., Kamyshinsky R.A., Chvalun S.N. Low-filled suspensions of  $\alpha$ -chitin nanorods for electrorheological applications // Carbohydr. Polym. 2022. V. 277. P. 118792.
16. Ковалева В.В., **Кузнецов Н.М.**, Вдовиченко А.Ю., Загоскин Ю.Д., Григорьев Т.Е., Чвалун С.Н. Влияние температуры на электрореологическое поведение частиц пористого хитозана в полидиметилсилоксане // Доклады Российской Академии наук. Химия, науки о материалах. 2022. Т. 502. С. 54-59.
17. **Kuznetsov N.M.**, Vdovichenko A.Yu., Bakirov A.V., Belousov S.I., Kamyshinsky R.A., Vasiliev A.L., Kulikova E.S., Svetogorov R.D., Chvalun S.N., Yudina E.B., Vul' A.Ya. The size effect of faceted detonation nanodiamond particles on electrorheological behavior of suspensions in mineral oil // Diam. Relat. Mater. 2022. V. 125. P. 108967.
18. **Kuznetsov N.M.**, Kovaleva V.V., Belousov S.I., Chvalun S.N. Electrorheological fluids: from historical retrospective to recent trends // Mater. Today Chem. 2022. V. 26. P. 101066.
19. **Kuznetsov N.M.**, Kovaleva V.V., Volkov D.A., Zagoskin Y.D., Vdovichenko A.Yu., Malakhov S.N., Bakirov A.V., Yastremsky E.V., Kamyshinsky R.A., Stupnikov A.A., Chvalun S.N., Grigoriev T.E. Porous chitosan particles doped by in situ formed silver nanoparticles: Electrorheological response in silicon oil // Polym. Adv. Technol. 2022. V. 33. P. 3643–3657.
20. Solodukhin E.S., **Kuznetsov N.M.**, Puchkov A.A., Belousov S.I., Chvalun S.N. The nature of the electrorheological and electrophoretic effects of detonation nanodiamonds suspensions in mineral oil // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65, № 10. P. 61–69.

По своему содержанию опубликованные работы посвящены комплексным исследованиям структуры и свойств электрореологических жидкостей с наполнителями различной природы и формы, а также способам управления характеристиками материалов под действием электрического поля при низкой концентрации дисперсной фазы за счет регулирования состава жидкостей, а также химической природы поверхности и морфологии частиц наполнителя.

На автореферат поступило 9 отзывов. Все отзывы положительные:

1. Отзыв из Института химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново, подписан Агафоновым А.В., доктором химических наук, профессором, заведующий отделом «Научные и технологические основы получения функциональных материалов и нанокompозитов». Содержит замечания:
  - В автореферате нет обоснования выбора активаторов дисперсных фаз электрореологических жидкостей, которые использовал автор.
  - Скорость осаждения твердой фазы является критичной для использования электрореологических жидкостей. Такие данные следовало привести.
  - Для исследованных в диссертации электрореологических жидкостей с диэлектрическими наполнителями величина эффекта связана с фактором проводимости. Интересно было проанализировать зависимости сила тока от приложенного напряжения и зависимость напряжения сдвига от проводимости суспензий в поле для изученных систем.
2. Отзыв из Института высокомолекулярных соединений Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, подписан Юдиным В.Е., доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником лаборатории Механики полимеров и композиционных материалов. Содержит замечания:
  - В автореферате отражены основные результаты, полученные при исследовании суспензий слоистых алюмосиликатов, в том числе модифицированных монтмориллонитов. Автор использовал в своей работе три типа модифицированных наполнителей – Cloisite Na<sup>+</sup> и органо-модифицированные Cloisite 30B и Nanofil SE3010. Было бы хорошо кратко описать, какие различия в химической структуре у двух последних модифицированных форм.
  - На стр. 15, строка 1 снизу есть замечание о фрактальных кластерах: «Таким образом в суспензиях 5 нм нанодiamondов практически все частицы участвуют в образовании фрактальных кластеров, а в суспензиях 3 нм нанодiamondов часть частиц остается изолированно.», но непонятна причина.
  - Стр. 17, строка 11 сверху. Непонятно, почему в ПМС 50 и ПМС 400 предел текучести ниже, чем у ПМС 100 (вязкость соответствует номеру). Возможно, в самой диссертации это объяснено.
  - На с. 19 автореферата автор отмечает, что устойчивость суспензий определяется не только совместимостью наполнителя с дисперсионной средой, но и качеством

диспергирования, при этом в автореферате, к сожалению, даже в кратком виде не указаны условия диспергирования, применяемые для получения суспензий.

- Любые частицы в любой жидкости создают сольватные слои, что приводит к увеличению вязкости раствора, к уменьшению седиментации и к изменению взаимодействия между самими частицами (естественно, разной толщины, вплоть до отсутствия, и с разным влиянием на вязкость) – в работе это не исследовано и даже не отмечено.
3. Отзыв из Института физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук, г. Москва, подписанный Бойнович Л.Б., доктором физико-математических наук, академиком РАН, главным научным сотрудником Лаборатории поверхностных сил. Замечаний и вопросов не содержит.
  4. Отзыв из Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, подписанный Зегря Г.Г., доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником, руководителем сектора теоретических основ микроэлектроники. Содержит замечания:
    - Первое из шести положений, выносимых на защиту, не является научным утверждением, в отличие от остальных пяти.
    - В автореферате отсутствует упоминание о содержании первой и второй главы диссертации, в отличие от четырех других глав.
    - Из текста автореферата не понятно, что имеет в виду автор, утверждая, что: «..образование фрактальных структур вызвано разделением зарядов на поверхности наноалмазных частиц» и каким образом автор доказывает «равномерность распределения функциональных групп на поверхности ограниченной алмазной наночастицы с разными кристаллографическими индексами» (стр. 11 автореферата).
    - Остается неясным, что понимает автор под качеством диспергирования, утверждая, что: «Устойчивость суспензий монтмориллонита определяется не только совместимостью с дисперсионной средой (природа модификатора), но также и качеством диспергирования» (стр. 19 автореферата).
    - Из текста автореферата остается не ясным, как и какие поверхностные состояния хитина влияют на энергию активации релаксации (стр. 26 автореферата).
  5. Отзыв из АО «НИИграфит» Госкорпорации по атомной энергии «РОСАТОМ», г. Москва, подписанный Самойловым В.М., доктором технических наук, главным



- научным сотрудником. В качестве пожелания отмечается недостаточно подробное обоснование выбора нанодiamondов детонационного синтеза в качестве дисперсной фазы.
6. Отзыв из Национального исследовательского университета "МЭИ", г. Москва, подписанный Смирновым С.Е., доктором технических наук, профессором, профессором кафедры химии и электрохимической энергетики. Замечаний и вопросов не содержит.
  7. Отзыв из Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, г. Москва, подписанный Зезиным А.А., доктором химических наук, профессором, главным научным сотрудником. Содержит замечания:
    - Страница 12: «менее выраженное разделение зарядов на гранях 3 нм частиц, обусловленное как менее выраженной огранкой, так и различными дефектами». Критерии разницы в огранке и дефектов нанодiamondов в автореферате не обсуждаются.
    - Страница 24: «среднее характеристическое отношение изолированных наностержней  $\alpha$ -хитина составляет  $\sim 70$ » Следовало бы в этой оценке учитывать также наличие агломератов.
    - Страница 31: Отсутствует информация о размерах и распределении по размерам наночастиц серебра.
    - Следует отметить редакционные недочеты: Рисунок 14. Обозначение Время, день следовало заменить на Время, сутки. На Рисунке 3 использован слишком мелкий шрифт для формата автореферата на обозначениях рисунков.
  8. Отзыв из Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Долгопрудный, подписанный Щербиной М.А., доктором физико-математических наук, доцентом ИНБИКСТ МФТИ. Замечаний и вопросов не содержит.
  9. Отзыв из Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, подписанный Сергеевым В.Г., доктором химических наук, заведующим кафедрой коллоидной химии химического факультета. Замечаний и вопросов не содержит.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается тем, что:

Крамаренко Елена Юльевна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики полимеров и кристаллов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва, является авторитетным специалистом в области физики и химии полимеров, композиционных материалов и наноструктур, автор большого числа работ, посвященных исследованию магниточувствительных и функциональных полимерных нанокомпозитов.

Куличихин Валерий Григорьевич, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории реологии полимеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, г. Москва, является ведущим российским специалистом в области реологии, коллоидной и физической химии. Оппонент имеет большой опыт работы по изучению структуры и свойств жидкокристаллических полимеров, смесей полимеров с различной степенью совместимости, эластомеров, адгезивов и композиционных материалов, включая дисперсные наполнители и в частности монтмориллонит.

Патлажан Станислав Абрамович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории физики и механики полимеров Отдела полимеров и композиционных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва, является специалистом в области реологии и структуры многокомпонентных, в том числе полимерных и композиционных, материалов. Большое число работ оппонента посвящены исследованию свойств и процессов в различных материалах и веществах при сдвиговых деформациях и течении, и роли химической природы и структуры материалов в этих процессах.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН), Московская обл., г. Черноголовка, является ведущим научно-исследовательским центром в России по проблемам химической физики и созданию новых материалов и наноматериалов с заданными свойствами и функциями.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований** разработан подход к созданию низкоконцентрированных электрореологических жидкостей с контрастным изменением свойств под действием внешнего стимула, который заключается в направленном изменении состава, структурной организации и электрических характеристик дисперсной фазы, химической природы и вязкости дисперсионной среды.

- Установлены зависимости основных характеристик электрореологических жидкостей: статического предела текучести, значений модулей накопления и потерь, а также воспроизводимости реологических параметров от напряженности электрического поля для дисперсий частиц различной размерности – детонационных наноалмазов,  $\alpha$ -хитина, галлуазита, монтмориллонита, высокопористых микрочастиц хитозана и композиционных наполнителей на их основе в дисперсионных средах различной природы – силиконовом, минеральном и оливковом масле.

- Объяснена природа золь-гель перехода дисперсий детонационных наноалмазов в воде, обусловленная формированием протяженных кластеров фрактальной природы из-за неоднородного электрического потенциала индивидуальной частицы. Полученные представления о структурной организации детонационных наноалмазов в жидких средах позволили разработать новые седиментационно-устойчивые электрореологические жидкости с низкой концентрацией дисперсной фазы до 4 масс.%, демонстрирующие значения статического предела текучести до 90 Па при 7 кВ/мм.

- Предложено теоретическое объяснение явления электрофореза в дисперсиях карбоксилированных наноалмазов детонационного синтеза в диэлектрических жидких средах, связанное с взаимодействием карбоксильных групп с молекулами адсорбированной воды и образованием заряда на поверхности.

- Обнаружено, что размеры и дефектность огранки гидрированных частиц детонационных наноалмазов определяют реологическое поведение дисперсий, структурную организацию наполнителя и агрегационную устойчивость. Значения статического предела текучести уменьшаются в 1,5 раза (46 и 31 Па соответственно при 5 кВ/мм) при изменении среднего размера частиц от 5 до 3 нм.

- Показана роль высокого характеристического отношения частиц наполнителя при создании электрореологических жидкостей с низкой концентрацией дисперсной фазы, проявляющих контрастное изменение реологических свойств за счет ориентации

наполнителя и формирования перколяционной сетки в электрическом поле при более низкой концентрации по сравнению с изометричными частицами. Статический предел текучести дисперсий в электрическом поле напряженностью до 7 кВ/мм изменяется до 40 и 160 Па при 8 масс.% содержании наночастиц галлуазита и монтмориллонита, и до 220 Па при концентрации  $\alpha$ -хитина 1 масс.% соответственно.

- Выявлена ключевая роль надмолекулярной структурной организации дисперсной фазы в суспензии при создании эффективных электрореологических жидкостей с заданными свойствами. Разработан подход к получению микроразмерных наноструктурированных полимерных наполнителей с высокой пористостью – дисперсии частиц хитозана при концентрации 1 масс.% проявляют отклик на электрическое поле до 7 кВ/мм и демонстрируют рост значений статического предела текучести до 540 Па. Разветвленная структура пористого каркаса частиц хитозана обуславливает высокую седиментационную устойчивость дисперсий (седиментационное отношение составляет 98%), а также стабильность и величину электрореологического отклика в расширенном диапазоне температур как минимум от 0 до 50°C. Показано, что регулирование электрических свойств микрочастиц и электрореологических характеристик дисперсий возможно путем создания композиционных наполнителей.

- Полученные результаты легли в основу нового научного направления – создания низконаполненных электро-чувствительных дисперсных систем, обладающих заранее заданными, регулируемые электрореологическими свойствами.

**Практическая значимость полученных соискателем результатов исследования заключается в том, что** разработан новый подход к управлению свойствами стимул-чувствительных дисперсных систем за счет контролируемого изменения их состава и структурной организации наполнителя. Получены новые электрореологические жидкости с низкой концентрацией дисперсной фазы и регулируемые свойствами, важные для различных областей техники и обладающие потенциалом для применения в качестве рабочего тела демпферов, заслонок, элементов движения и сенсорики мягкой и твердотельной робототехники, тактильных датчиков и высокочувствительных экспресс-сенсоров нового поколения, в том числе медицинского назначения. Полученный набор данных реологического поведения дисперсий без и под действием электрического поля позволяет осуществлять подбор составов для конкретных эксплуатационных задач. Физические закономерности электрореологического эффекта и природа структурных

перестроек наночастиц в экстремальных условиях электрических полей высокой напряженности имеют важное значение для прогнозирования механических свойств материалов и расширяют представления о устойчивости и поведении дисперсных систем. Применение природных компонентов – оливкового масла и полимерных наполнителей – полисахаридов показывает принципиальную возможность создания полностью экологически безопасных материалов и открывает перспективы восстановления баланса между техно- и биосферой.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается использованием в работе комплекса современных методов исследования, согласованностью данных, полученных разными физическими и физико-химическими методами, а также их воспроизводимостью. В работе при создании электрореологических жидкостей и изучении их свойств использовано современное высокоточное научное оборудование. Полученные данные обработаны с помощью профессионального программного обеспечения. Достоверность результатов также обосновывается применением устоявшихся в мировой научной практике методик и теоретических положений при анализе и интерпретации результатов, полученных с помощью независимых методов, а также подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых научных журналах. Согласие экспериментальных данных с существующими теоретическими принципами и данными независимых работ в области электрореологии подтверждают высокую степень достоверности исследований.

**Личный вклад автора является определяющим на всех этапах работы** от постановки цели, формулировки конкретных задач исследований, выбора путей и методов их решения до непосредственного научного руководства всеми исследованиями и выполнения основной части экспериментальных работ, анализа и обобщения полученных данных. Соискатель является ключевым автором концептуальных идей описанных в работе исследований.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания в форме предложений более детально осветить некоторые аспекты работы: есть ли корреляция в ориентации индивидуальных наноалмазных частиц во фрактальной структуре, видно ли это экспериментально, зависит ли от этого фрактальная размерность кластеров и какова она, какой метод моделирования использовали при исследовании взаимодействия наноалмазных частиц и как выбирали значение потенциала, насколько

важна в данном случае роль огранки и наличие разных кристаллографических граней у индивидуальной наноалмазной частицы, можно ли провести аналогии между структурированием электрореологических жидкостей и поведением жидких кристаллов, каково время отклика исследованных материалов на стимулирование электрическим полем, в каком состоянии – ориентированном электрическим полем или нет исследованы электрофизические характеристики жидкостей, связан ли механизм электрореологического эффекта с дипольными моментами частиц и требуется ли электрическое поле для структурирования наполнителя в дисперсии, существуют ли критерии оценки уровня характеристик электрореологических жидкостей и какое место занимают исследованные в работе материалы в мировом научном и экономическом ландшафте.

Кузнецов Н.М. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию. Согласно теоретическим представлениям наноалмазы должны взаимодействовать разными гранями с различной ориентацией индивидуальных частиц относительно друг друга во фрактальном кластере, размерность которого зависит от среднего размера частиц и составляет 2,2 в случае 5 нм частиц – более разветвленный агломерат, и 1,7 для 3 нм частиц, у которых вклад поверхности и дефектов сказывается сильнее и приводит к более низкой фрактальной размерности. Экспериментально в работе ориентация индивидуальных частиц не была исследована, получены теоретические результаты на основе теории функционала плотности и расчетов из первых принципов, которые проводили, опираясь также на литературные данные. Форма наноалмазных частиц представляет собой усеченный октаэдр, что является необходимым условием для разделения заряда на поверхности частицы и приводит к выигрышу в энергии при взаимодействии, для одинаковых граней перераспределения заряда быть не должно. Аналогию между поведением электрореологических жидкостей и жидкими кристаллами провести можно, но это не тоже самое, потому что для электрореологических жидкостей нет оптического ответа в виду большого размера частиц, высокой мутности суспензий и отсутствия порядка между условными слоями частиц в жидкости. При приложении электрического поля оптические свойства дисперсий не меняются или меняются слабо, зато наблюдается макроэффект изменения реологического поведения – появляется предел текучести. Время отклика электрореологических жидкостей определяется из электрофизических спектров, по величине обратной положению максимума поляризуемости на частотной зависимости, который типично находится в области  $10^3$ - $10^4$  Гц. Электрофизические характеристики исследованы в нативном состоянии, когда ориентированная колончатая структура отсутствует. Электрическое поле необходимо для структурирования жидкостей, поскольку частицы дисперсной фазы не обладают

собственным дипольным моментом, который появляется именно при поляризации и ведет к формированию и росту колончатых структур за счет диполь-дипольного взаимодействия частиц. Стоимость исследуемых материалов сильно варьирует, а приведенная оценка не является абсолютной, поскольку в настоящее время отсутствует промышленное производство ряда используемых в работе наполнителей, например, наностержней хитина, высокопористых частиц хитозана, функционализированных наноалмазов детонационного синтеза. Сопоставление исследуемых в диссертационной работе жидкостей по сходным характеристикам (предел текучести, седиментационная устойчивость, контрастность изменения свойств) с составами известными в литературе показало их экономическую привлекательность. Универсальных критериев характеристик электрореологических жидкостей до сих пор не существует, потому что в зависимости от определенного практического применения предъявляются различные требования, например, такие как твердость и абразивность наполнителя для процессов электрополировки или быстрый отклик и контрастность перехода от вязкого поведения к упругому для микрофлюидных установок. По ряду составов характеристики жидкостей превосходят мировые результаты. О высоком уровне исследований, проведенных в рамках диссертации, также свидетельствуют публикации в высокорейтинговых международных научных журналах.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация Кузнецова Н.М. «Электрореологические жидкости: состав, структура, свойства», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции).

На заседании 06 февраля 2024 г. диссертационный совет принял решение за разработку подхода к управлению свойствами электрореологических жидкостей с низкой концентрацией дисперсной фазы и контрастным изменением свойств под действием электрического поля, и установление основных закономерностей электрореологического эффекта суспензий на основе дисперсионных сред различной природы (силиконового, минерального и оливкового масел), наполненных частицами слоистых алюмосиликатов, детонационных наноалмазов, полисахаридов и их композитов, присудить Кузнецову Никите Михайловичу учёную степень доктора физико-математических наук по

специальности 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек (в том числе присутствовали удаленно 6 человек), из них 6 докторов наук по специальности диссертации 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение учёной степени – 17,  
против присуждения учёной степени – 0,  
не участвовали в голосовании – 0.

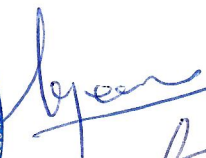
Протокол о результатах тайного электронного голосования утверждён открытым голосованием – единогласно.

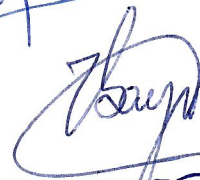
Председательствующий  
диссертационного совета, д.ф.-м.

Председатель  
диссертационного совета,  
д.х.н., проф., чл.-корр. РАН

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.ф.-м.н.



 Э.Х. Мухамеджанов

 С.Н. Чвалун

 Т.Е. Григорьев

06.02.2024