

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

© 2025 г. Н. М. Кузнецов^{1, *}, С. Н. Чвалун^{1, 2}

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова, 1,
Москва, 123182 Россия

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,
ул. Профсоюзная, 70, Москва, 117393 Россия

*e-mail: kyz993@yandex.ru

Аннотация. В обзоре рассмотрены исследовательские работы в области электрореологии за последние годы. Представлены основные активно развиваемые направления исследований. Суммированы последние достижения как в области разработки новых материалов, так и теоретического описания эффекта. Рассмотрен прогресс в области практического применения, а также отмечены оригинальные перспективные приложения электрореологического эффекта.

Ключевые слова: стимул-чувствительные материалы, электрореологические жидкости, жидкости с двойным откликом, магнитореологический эффект, коллоиды, мягкие материалы

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках Госзадания НИЦ “Курчатовский институт” и при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 22-73-10081-П) в части анализа исследований новых типов наполнителей.

Соблюдение этических стандартов. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.09.2025
После доработки 18.09.2025
Принята к публикации 18.09.2025

RECENT ADVANCES IN ELECTORRHEOLOGICAL FLUIDS

N. M. Kuznetsov^{1, *}, S. N. Chvalun^{1, 2}

¹*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia*

²*Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117393 Russia*

**e-mail: kyz993@yandex.ru*

Abstract. The review examines research studies in the field of electrorheology in recent years. The main actively developing research areas are presented. The latest achievements in both the development of novel materials and the theoretical description of the effect are summarized. The progress in the field of practical application is considered and original promising applications of the electrorheological effect are noted.

Keywords: stimulus-sensitive materials, electrorheological fluids, dual-responsive fluids, magnetorheological effect, colloids, soft materials

Funding. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Kurchatov Institute Research Center and with partial financial support from the Russian Science Foundation (grant 22-73-10081-p) in terms of analyzing research on new types of fillers.

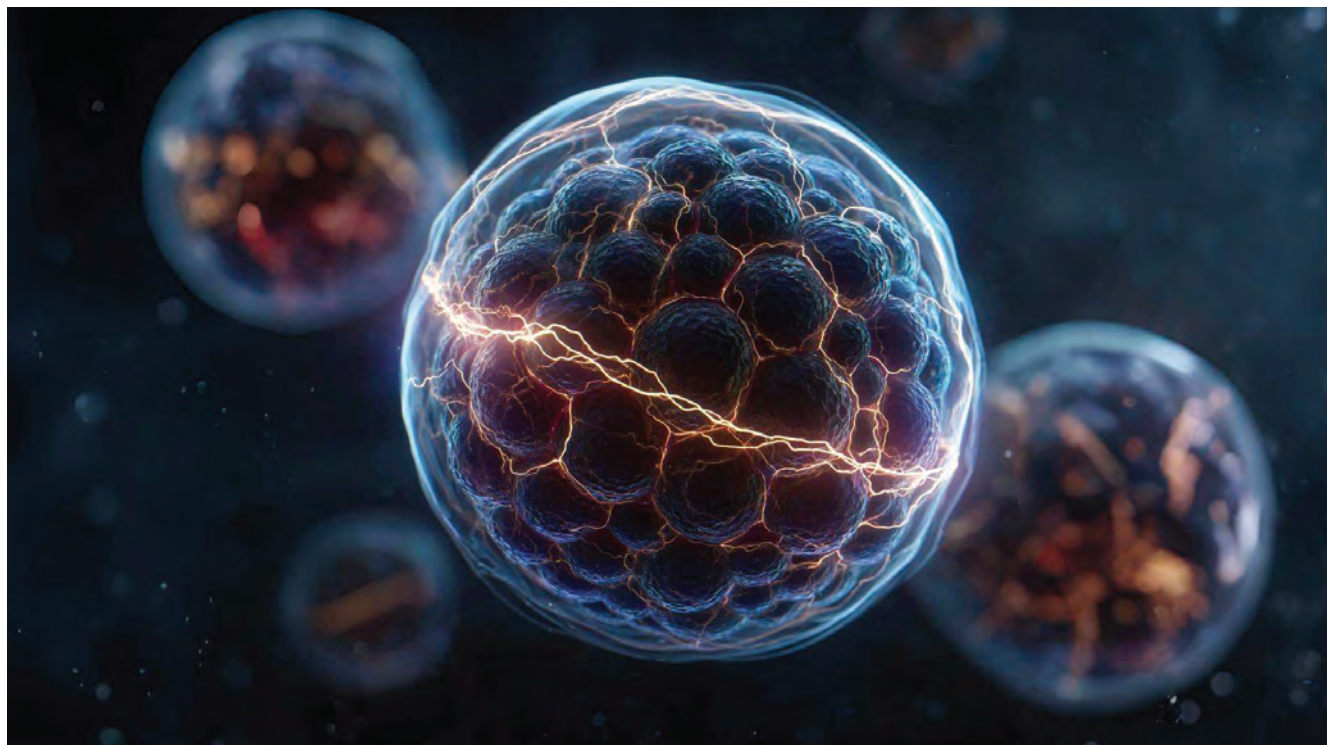
Ethics declarations. There are no human or animal studies in this work.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

Received September 12, 2025

Revised September 18, 2025

Accepted September 18, 2025



Графическая аннотация сгенерирована с помощью нейросети Midjourney V7.
The graphical annotation was generated using the Midjourney V7 neural network.

ВВЕДЕНИЕ

Электрореология – наука, изучающая деформационные свойства и текучесть материалов при сдвиге под действием электрического поля. После открытия электрореологического эффекта У. Уинслоу в середине XX века [1] развитие электрореологии неразрывно связано с отечественными исследователями. Начиная с 60-х годов прошлого столетия в Украинской ССР тематику развивал Ю.Ф. Дейнега при сотрудничестве со своим учителем Г.В. Виноградовым (Институт нефтехимического синтеза, Москва) [2–6]. На территории Белорусской ССР формировалась научная школа под руководством академика А.В. Лыкова [7], которая получила развитие во многом благодаря работам З.П. Шульмана [8–12]. В СССР была опубликована первая в мире книга по электрореологии [13]. Также вклад в развитие научного направления внесли работы Л.Г. Гиндина, А.Е. Вольпяна, Б.Я. Ямпольского [14]. После распада Советского Союза тематику удалось сохранить и научно-исследовательские работы были продолжены в Белоруссии в группе Е.В. Коробко [15–20], в России в группе А.В. Агафонова [21–26] и позднее в лаборатории С.Н. Чвалуна [27–32].

В настоящее время под электрореологическим эффектом чаще всего подразумевают увеличение вязкости и даже появление предела текучести суспензий

под действием электрического поля. Такие изменения вызваны формированием фибриллярных или колончатых структур из частиц дисперсной фазы. Эффект относится к электрокинетическим явлениям, в большинстве случаев – ориентации и структурированию [6]. Природа электрореологического отклика связана с поляризацией частиц дисперсной фазы. В литературе также встречается понятие отрицательного электрореологического эффекта, то есть снижения вязкости жидкости под действием электрического поля в виду иных электрокинетических явлений – электрофореза или диэлектрофореза. Однако в последние годы число исследований, посвященных этому явлению, невелико [33–35].

Частицы дисперсной фазы остаются наиболее вариативным компонентом электрореологических жидкостей. Поэтому большинство современных исследований посвящено поиску путей модификации и получения новых наполнителей. Основные научные направления сегодня включают ионные жидкости, полые частицы, высокопористые полимерные наполнители низкой плотности. Далее остановимся более подробно на каждом из них. Быстрый и обратимый переход из жидкого состояния в твердое обуславливает принадлежность электрореологических материалов к «умным» или стимул-чувствительным, а электрореологический эффект находит широкое

применение в различных технологиях и устройствах, реализованных на нетрадиционных принципах, например, демпферах, заслонках, тактильных датчиках, сенсорах, акустических призмах, прецизионной электрополировке, микрофлюидной технологии, транспортировке нефти, мягкой робототехнике и др. [36]. Представленный обзор суммирует мировые достижения последних лет в области электрореологии.

НОВЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Электрореологические свойства жидкостей определяются множеством параметров и критериев, например, концентрацией дисперсной фазы, значениями предела текучести и модулей накопления и потерь под действием электрического поля, вязкостью вне электрического поля, контрастностью изменения свойств при стимулировании (относительной эффективностью), рабочим диапазоном напряженностей электрического поля, стабильностью отклика, в том числе при различных температурах, долговечностью, седиментационной устойчивостью, ценой и др. В настоящее время не существует идеальной электрореологической жидкости, поскольку исследователям до сих пор не удалось получить лучшие показатели по одновременно всем параметрам, и поэтому крайне важно соблюдать их баланс. Именно свойства наполнителя позволяют в широком диапазоне менять перечисленные характеристики жидкостей, хотя роль дисперсионной среды и добавок также может быть существенна. В зависимости от состава и концентрации наполнителя, которая изменяется от долей и единиц до десятков массовых процентов, предел текучести жидкостей в электрическом поле может изменяться от единиц Па до сотен кПа. При этом относительная эффективность, то есть контрастность изменения реологического поведения также варьирует от нескольких раз до пяти порядков величины [36]. В представленном разделе более детально рассмотрим последние достижения в области электрореологии, связанные с новыми типами наполнителей и подходами к управлению и оптимизации их свойств.

Частицы со структурой ядро—оболочка

Е. Pavlikova и др. рассмотрели в качестве наполнителя для электрореологических жидкостей гибридные частицы на основе углеродных материалов с оболочкой из диоксида кремния, полученные карбонизацией из глюкозы с последующим формированием оболочки по золь-гель методу [37]. Показано, что карбонизованные частицы в жидкости имеют ограниченный диапазон рабочих напряженностей электрического поля (до 1 кВ/мм) из-за чрезмерной проводимости, приводящей к высоким значениям тока утечки. Формирование на поверхности частиц

оболочки диоксида кремния позволяет оптимизировать электрические характеристики, расширить диапазон электрического поля и достичь значений предела текучести порядка 100 Па при 3 кВ/мм и 5 масс. % содержании наполнителя с мезопористым поверхностным слоем. Тем не менее формирование оболочки приводит к ухудшению седиментационной устойчивости. К достоинствам работы также можно отнести использование природного возобновляемого сырья в качестве прекурсора углеродных частиц. Исследование подтверждает важность регулирования электрических свойств наполнителя, особенно проводимости для стабильного отклика жидкостей в широком диапазоне напряженностей электрического поля.

Другой тип карбонизованных частиц со структурой ядро—оболочка использовали S. Chen и др. [38]. В качестве ядра применяли титанат бария, а карбонизованную оболочку получали из полидофамина, предварительно синтезированного на поверхности наночастиц. В работе выявлено влияние типа гибридации углерода в оболочке (sp^3 или sp^2) на электрореологические свойства жидкостей. Данные показывают, что степень графитизации возрастает до 69.6% с увеличением времени полимеризации дофамина до 48 часов. При этом авторы отмечают оптимум времени полимеризации 24 часа, который приводит к максимальному содержанию C—O связей. Поэтому, несмотря на промежуточное значение силы диэлектрической релаксации ($\Delta\epsilon$) среди рассмотренных материалов, жидкости, наполненные этими частицами, проявляют наибольший электрореологический эффект — предел текучести достигает 1140 Па при 4 кВ/мм и содержании частиц 12 об. %. В работе выдвинута гипотеза, что электрореологический эффект определяется балансом содержания sp^3 фазы в карбонизованной оболочке и кислородсодержащих функциональных групп на поверхности. Результаты исследования получили развитие в следующей работе авторов при получении полых углеродных частиц с оболочкой из диоксида титана [39]. Отмечается буферный эффект оболочки, затрудняющий движение электронов по сравнению с углеродными частицами, что приводит к снижению значений тока утечки, повышению стабильности отклика жидкостей и расширению рабочего диапазона электрических полей. Наполнители получали по методу жертвенных шаблонов из частиц полистирола с оболочкой полидофамина, которые далее карбонизовали. Оболочку из диоксида титана получали на поверхности сформованных частиц по реакции гидролиза тетрабутилтитаната (Рис. 1). Показано, что аморфная оболочка TiO_2 также повышает поверхностную поляризацию частиц и более предпочтительна в отличие от кристаллической со структурой анатаза. Наибольшее значение предела текучести порядка 7.8 кПа удалось достичь для жидкости с 15 масс. %

содержанием наполнителя при напряженности электрического поля 3 кВ/мм.

D. Kang и др. предложили подход к созданию полых наполнителей пластинчатой морфологии на основе диоксида титана [40]. Титансодержащую оболочку получали по золь-гель технологии на поверхности стеклянных пластинок, которые впоследствии выщелачивали. Предел текучести электрореологической жидкости, наполненной такими полыми частицами, достигает порядка 90 Па при 3 масс. % и напряженности поля 4 кВ/мм. Значение оказывается выше по сравнению с исходными стеклянными частицами и промежуточным продуктом со структурой ядро-оболочка. Отметим, что полые частицы в дисперсии обладают более высокой седиментационной устойчивостью в виду более низкой плотности.

Металл-органические каркасные структуры (MOF) представляют собой специальные высокомолекулярные структуры, уникальный комплекс, образованный металлическими кластерами или ионами металлов и органическими линкерами [41]. В последние годы MOF активно рассматривают в качестве наполнителей для электрореологических жидкостей. *L. Wang и др.* исследовали композиционные наполнители на основе MOF из титана (MOF-Ti, MIL-125), покрытого оболочкой полианилина (ПАНИ) [42]. Композиционные частицы проявляют повышенный электрореологический эффект по сравнению с исходным MOF-Ti, за счет структуры ядро-оболочка и усиления межфазной поляризации. Однако авторам не удалось выявить значительной корреляции эффекта от толщины оболочки (содержания ПАНИ при синтезе). Предел текучести

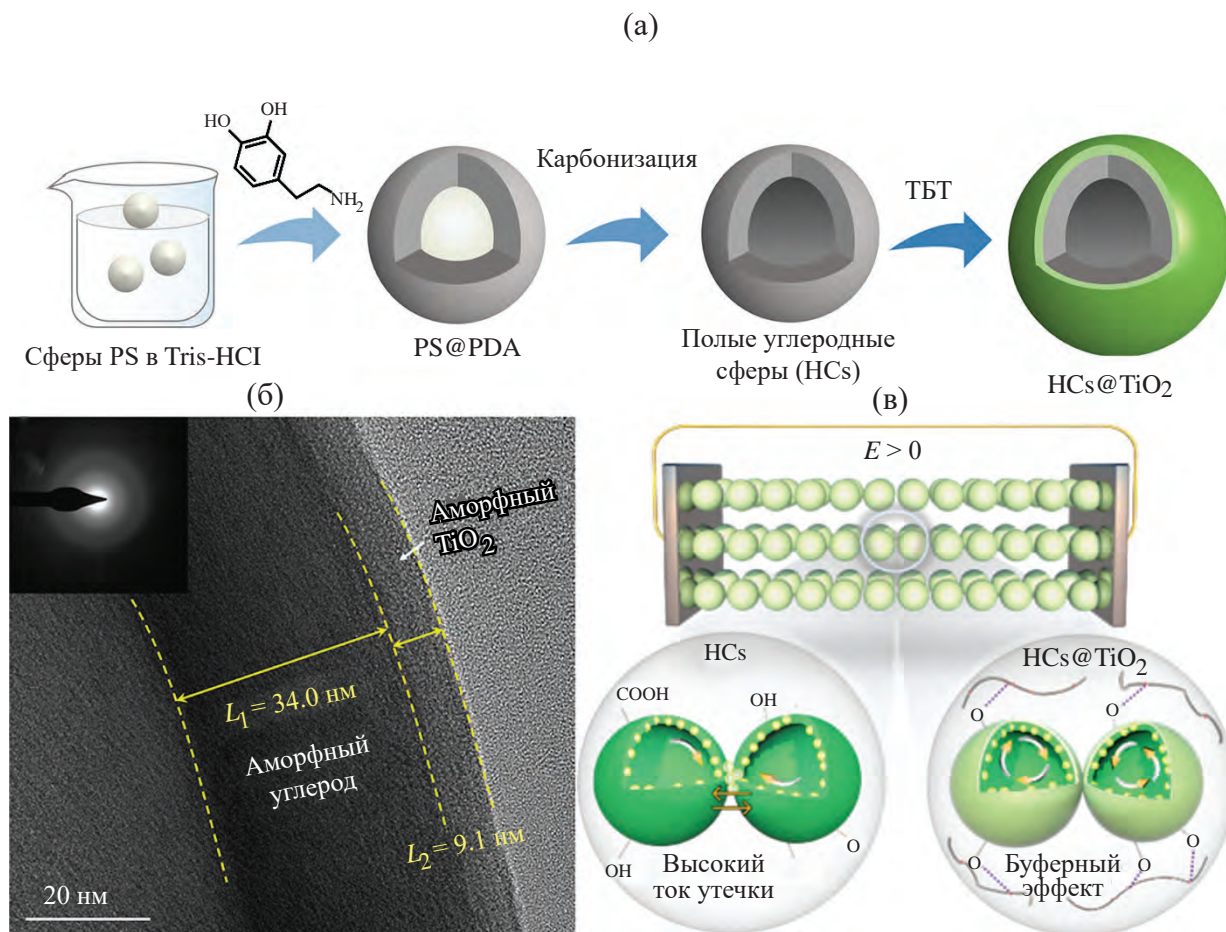


Рис. 1. Схематическая иллюстрация получения полых углеродных частиц со структурой ядро-оболочка (а), микрофотография просвечивающей электронной микроскопии полый частицы (б), схематическая иллюстрация роли оболочки в электрореологическом поведении полых углеродных частиц (в). Адаптировано из работы [39]. Copyright © 2025, American Chemical Society.

Fig. 1. Schematic illustration of the production of hollow carbon particles with a core-shell structure (a), micrograph of transmission electron microscopy of a hollow particle (b), schematic illustration of the role of the shell in the electrorheological behavior of hollow carbon particles (c). Adapted from [39]. Copyright © 2025, American Chemical Society.

жидкостей находится на уровне 200 Па при 10 масс. % и напряженности электрического поля 3 кВ/мм. Развивая это направление исследований, в другой публикации авторы сообщают о создании частиц на основе MIL-125 с оболочкой из диоксида кремния [43]. Диоксид кремния также выполняет роль экранирования высокопроводящего MOF каркаса и позволяет регулировать электрические характеристики материала. Оптимальным был определен состав, полученный добавлением 1 мл тетраэтоксисилана (ТЭОС) на 0.5 г частиц MIL-125. Именно в этом случае удалось получить наиболее однородную оболочку на поверхности частиц и высокий электро-реологический отклик дисперсии. Предел текучести при 10 масс. % содержания наполнителя достигает ~326 Па при напряженности поля 3 кВ/мм. Следующий шаг в оптимизации электрических свойств MIL-125 заключался в получении тройных композиционных наполнителей состава MIL-125/MoS₂/SiO₂ [44]. Частицы получали в две стадии: сначала формировали каркас MOF в присутствии предварительно синтезированных частиц MoS₂ и далее на поверхности полученных частиц синтезировали оболочку SiO₂ по золь-гель технологии (метод Штобера). Сформованные частицы обладают ромбовидной морфологией с шероховатой поверхностью (Рис. 2). Элементное картирование подтверждает достаточно однородное

допирование MOF сульфидом молибдена и инкапсуляцию частиц в диоксид кремния с формированием структуры ядро-оболочка. При малом содержании ТЭОС в реакционной смеси (1–1.5 мл на 0.5 г частиц) экранирование частиц недостаточно и ведет к высокой проводимости в дисперсиях. Так, при 10 масс. % наблюдается высокий ток утечки, а рабочий диапазон напряженности электрического поля ограничен всего 2.5 кВ/мм. При увеличении содержания ТЭОС до 2 мл (и, как следствие, SiO₂ на поверхности частиц) удается оптимизировать электрические характеристики и жидкости с такими наполнителями демонстрируют стабильный отклик в электрическом поле до 3 кВ/мм, предел текучести составляет ~180 Па. Композиционные частицы обладают более высокой седиментационной устойчивостью в среде силиконового масла по сравнению с исходными частицами MoS₂. Отмечается небольшое снижение устойчивости для тройного композиционного наполнителя за счет увеличения плотности частиц из-за оболочки диоксида кремния. В продолжение исследований дополнительно было изучено влияние ионов La³⁺ в качестве допанта на электро-реологическое поведение MIL-125 в дисперсиях [45]. Отсутствие экранирующей оболочки на поверхности частиц обуславливает высокий ток утечки в жидкостях при напряженности поля более 2.5 кВ/мм и концентрации наполнителя

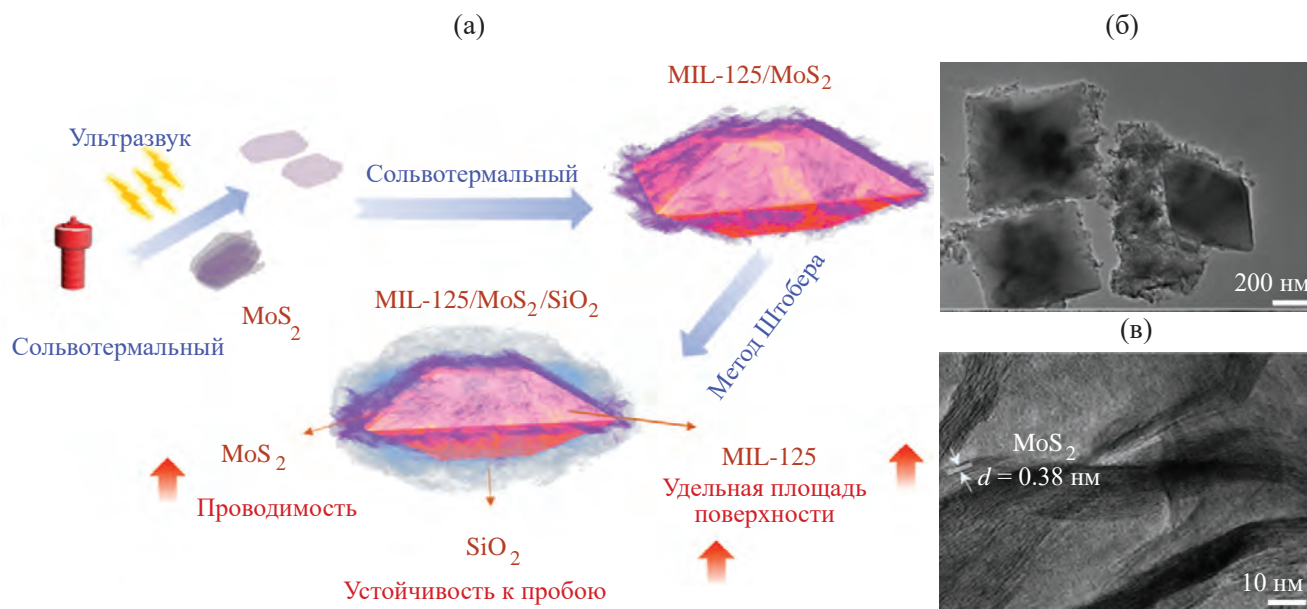


Рис. 2. Схематическая иллюстрация получения тройных композиционных наполнителей состава MIL-125/MoS₂/SiO₂ (а), микрофотография просвечивающей электронной микроскопии полученных частиц с содержанием 0.1 г MoS₂ и 2 мл ТЭОС в исходной реакционной смеси (б), типичная слоистая структура MoS₂ в промежуточном продукте MIL-125/MoS₂ (в). Адаптировано из работы [44]. Copyright © 2024, American Chemical Society.

Fig. 2. Schematic illustration of the production of triple composite fillers of the composition Mil-125/MoS₂/SiO₂ (a), transmission electron microscopy micrograph of the obtained particles with a content of 0.1 g MoS₂ and 2 ml TEOS in the initial reaction mixture (b), typical layered structure of MoS₂ in the intermediate product Mil-125 / MoS₂ (c). Adapted from [44]. Copyright © 2024, American Chemical Society.

10 масс. %, что согласуется с ранее проведенными исследованиями. Большое количество ионов La^{3+} (100 мг допанта $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ на 2 мл тетрабутилтитаната в реакционной смеси) в составе наполнителя сокращает этот диапазон до 2 кВ/мм. Максимальное значение предела текучести 1.7 кПа достигнуто для жидкости при концентрации наполнителя 30 масс. % с частицами, полученными при содержании допанта 30 мг, и напряженности электрического поля 2.5 кВ/мм. Исследование подтверждает перспективность подхода допирования наполнителя для повышения электрореологической активности.

Отдельным классом соединений, которые получили пристальное внимание в области электрореологии в последние годы, являются полиионные жидкости (PIL). PIL представляют собой полиэлектролиты, содержащие полимерную основу и фрагменты ионной жидкости в каждом из повторяющихся звеньев [46]. Так, *Y. Wang и др.* исследовали электрореологическую активность сферических частиц на основе двух PIL — поли([2-(метакрилоилокси)этил]триметиламмония бис(трифторметансульфонил)имид)а ($\text{P}[\text{MTMA}][\text{TFSI}]$) и поли([2-(метакрилоилокси)этил]триметиламмония [3-(метакрилоилокси)-пропилсульфонил]-(трифторметансульфонил)имид)а ($\text{P}[\text{MTMA}][\text{MPTFSI}]$), а также их комбинации со структурой ядро—оболочка ($\text{P}[\text{MTMA}][\text{TFSI}][\text{MTMA}][\text{MPTFSI}]$). Авторы отмечают слабый электрореологический отклик частиц $\text{P}[\text{MTMA}][\text{MPTFSI}]$, и потерю стабильности жидкостей на основе $\text{P}[\text{MTMA}][\text{TFSI}]$ с ростом температуры до 40°C. Однако комбинированный наполнитель $\text{P}[\text{MTMA}][\text{TFSI}][\text{MTMA}][\text{MPTFSI}]$ позволил получить электрореологическую жидкость со стабильным откликом в широком диапазоне температур до 100°C. При этом значения предела текучести возрастают с ростом температуры и достигают значения 360 Па при наполнении 15 об. % и напряженности электрического поля 3 кВ/мм.

Современные наполнители различной природы

Помимо рассмотренных выше частиц со структурой ядро—оболочка в качестве наполнителей электрореологических жидкостей исследуют материалы различной природы и формы. К ним относятся как полимерные частицы, так и неорганические, а также гибридные, полученные путем допирования или модификации на молекулярном уровне. Классическими остаются исследования полисахаридов, проводящих полимеров, оксидов металлов и алюмосиликатов (глин). Также активно исследуют новые типы наполнителей, к которым относятся каркасные структуры, в том числе перовскитного типа. Далее более подробно остановимся на экспериментальных исследованиях последних лет.

В более позднем исследовании наряду с $\text{P}[\text{MTMA}][\text{TFSI}]$ была выбрана другая PIL поли(2-(метакрилоилокси)этилтриметиламмоний)[гекса-фторфосфат]) ($\text{P}[\text{MTMA}][\text{PF}_6]$), а также их сополимеры с гексилметакрилатом (HMA) [47]. Роль HMA оказалась различной, так, жидкости на основе сополимерных частиц $\text{P}[\text{MTMA}][\text{TFSI}]$ проявляют повышенный эффект, а в случае $\text{P}[\text{MTMA}][\text{PF}_6]$, наоборот, пониженный. Авторы связывают наблюдаемые эффекты с различным влиянием HMA на подвижность противоионов и, как следствие, поляризуемости частиц. Наибольшее значение предела текучести 750 Па достигнуто для электрореологической жидкости, наполненной 20 об. % $\text{P}[\text{MTMA}][\text{PF}_6]$ -HMA, при 3 кВ/мм.

Особым типом каркасных структур являются ионно-ковалентные органические (iCOF), состоящие из ковалентной органической основы и ионных групп. iCOF обладают проводимостью, высокой площадью поверхности, регулируемые размерами пор и хорошей стабильностью [48]. *R. Ma и др.* исследовали электрореологическую активность $[\text{TFSI}]$ с катионом 1,3-бис(цианометил)имидазолия ($[\text{BCNIm}]$) [49]. Для получения ионно-электронных каркасов (ieCOF) $[\text{BCNIm}][\text{TFSI}]$ нагревали в токе азота при температурах 370, 390, 420 и 440°C, что приводит к различному содержанию ионов и степени карбонизации структуры конечного продукта. В результате образуются частицы неправильной формы размером 3–5 мкм. С повышением температуры края частиц становятся значительно острее, что указывает на рост твердости ieCOF. Смешанные ионно-электронные системы ieCOF (полученные при 390 и 420°C) обладают более сильной межфазной поляризацией по сравнению с ионно- и электронно-доминируемым каркасом (полученным при 370 и 440°C, соответственно), что отражается в различном электрореологическом отклике дисперсий. Максимальное значение предела текучести при 3 кВ/мм достигает ~1.73 кПа для жидкости, наполненной 20 об. % частиц, полученными при 390°C. В исследовании отмечается стабильный электрореологический отклик этой жидкости до 120°C с соответствующим ростом значений с температурой, по сравнению с остальными наполнителями. Для двух типов частиц, полученных при 420 и 440°C характерно снижение значений предела текучести, что связано с малым изменением поляризуемости и диэлектрической проницаемости этих образцов от температуры при интенсификации теплового движения. Образец синтезированный при 370°C обладает узким диапазоном стабильности до 40°C из-за резкого роста тока утечки ввиду высокой ионной подвижности.

G. Calis-Ismetoglu и др. рассмотрели в качестве наполнителей полиэлектролиты на основе

борорганических соединений, в частности полибораты винной кислоты с ионами лития (**Poly-LiTB**) и натрия (**Poly-NaTB**) [50]. Обнаружена более высокая активность наполнителя с литием, что объясняется меньшим размером и большей подвижностью иона. Однако рабочий диапазон напряженности электрического поля для таких систем оказался небольшим — до 2 кВ/мм. При этом максимальное значение предела текучести при 20 масс. % достигнуто порядка 265 и 195 Па для жидкостей, наполненных Poly-LiTB и Poly-NaTB, соответственно. Оригинальность исследования также заключается в проведении тестов на ползучесть. Сообщается о повышении степени восстановления упругих свойств под действием электрического поля по сравнению с поведением дисперсий вне поля. Такие исследования редко встречаются для электроореологических жидкостей. Отмечена перспективность применения коллоидных систем на основе полиэлектролитов борорганических соединений в качестве стимул-чувствительных материалов.

М. Cabuk и др. рассмотрели в качестве наполнителя электроореологических жидкостей частицы ПАНИ-графт-хитозана по сравнению с исходными полимерами и определили роль добавки поверхностно-активного вещества (**ПАВ**) (Triton X-100) на свойства дисперсий [51]. Для оптимизации электрических свойств наполнителей проводили их дедопирование, что привело к снижению электроореологического отклика дисперсий хитозана, однако повысило отклик дисперсий с наполнителями на основе ПАНИ и позволило также расширить диапазон рабочих напряженностей электрического поля до 4 кВ/мм. Роль ПАВ при этом оказалась минимальна — слабый рост вязкости в электрическом поле наблюдается только для дисперсий ПАНИ-графт-хитозана. Значение предела текучести достигает 212 Па при 3 кВ/мм для 15 об. % дисперсий ПАНИ-графт-хитозана.

J.P. Soares с соавторами исследовали влияние небольшого количества оксида железа (III) в составе частиц диоксида титана на электроореологический эффект [52]. Включение ионов железа в частицы TiO_2 вызывает структурные искажения и уменьшает размер частиц, увеличивая их площадь поверхности и дисперсность. Допирование Fe_2O_3 позволяет оптимизировать электрические свойства наполнителя и расширить рабочий диапазон напряженностей электрического поля от 1.5 до 4 кВ/мм. Оптимальное содержание допанта было выявлено 1 масс. %: жидкости с этим наполнителем достигают значений предела текучести ~275 Па при 4 кВ/мм и концентрации 15 масс. %. Также отмечается рост значений предела текучести при увеличении температуры до 60°C, что авторы объясняют снижением вязкости дисперсионной среды. Интересно отметить, что похожие композиционные частицы с оксидом железа в дисперсии способны также проявлять отклик на магнитное поле. Подробнее такие системы

с двойным откликом на электрическое/магнитное поле рассмотрены далее в соответствующем разделе.

К другому типу частиц, которые также могут быть чувствительны к действию не только электрического, но и магнитного поля относится гётит. *F. Agresti и др.* исследовали электроореологическое поведение пластин гётита и его композита с мочевиной в силиконовом масле [53]. При 5 об. % жидкости с модифицированным наполнителем демонстрируют более низкие значения предела текучести в электрическом поле по сравнению с частицами нативного гётита. Однако увеличение концентрации до 7 об. % позволило получить жидкость с пределом текучести ~2 кПа при напряженности поля 5 кВ/мм. Для нативного наполнителя близкие значения предела текучести ~1.8 кПа при той же напряженности поля удалось достигнуть при 9 об. %. Наблюдаемые экспериментальные факты свидетельствуют о наличии критической концентрации модифицированного наполнителя, при которой роль мочевины становится существенной, а частицы находятся в более тесном контакте. Добавление к частицам мочевины также снижает значения тока утечки при эксплуатации жидкостей.

Слоистые алюмосиликаты на протяжении многих лет привлекают внимание исследователей в области электроореологии в виду их природного происхождения и как следствие доступности, уникальной морфологии и зачастую высокого характеристического отношения частиц [54]. Одним из ярких представителей алюмосиликатов перспективных для электроореологических жидкостей является монтмориллонит (**ММТ**), состоящий из пластин толщиной порядка 1 нм и длиной, достигающей невероятных 500 нм [55]. В природе пластины склонны к образованию стопок по типу «колоды карт». Межслоевое пространство заполнено катионами, которые компенсируют избыточный отрицательный заряд, возникающий из-за дефектов изоморфного замещения кристаллической решетки. Модификация ММТ позволяет регулировать не только электрические свойства частиц, но также межплоскостное расстояние и способность стопок к эксфолиации в дисперсии — разрушению до индивидуальных пластин [56]. Именно поэтому для оптимизации электрических свойств и повышения электроореологического отклика нативных алюмосиликатов используют подходы к их модификации. *Y. Liu и др.* интеркалировали полиэтиленоксид (**РЕО**) в структуру стопок ММТ [57]. Отмечается, что РЕО был введен исключительно в межслоевое пространство и не содержится на поверхности пластин. При этом РЕО не замещает компенсационные катионы. Добавление РЕО повышает стабильность отклика жидкости, снижает ток утечки и расширяет рабочий диапазон напряженностей электрического поля. Жидкости с модифицированным наполнителем демонстрируют эффективность при температурах до 120°C по сравнению с нативным ММТ,

для которого наблюдается высокий ток утечки уже при 1 кВ/мм, а рабочий температурный диапазон не превышает 60°C. Для обоих типов наполнителя значения предела текучести возрастают с температурой. Максимальное значение предела текучести при повышенной температуре составляет 240 Па для жидкости, содержащей 15 об. % ММТ-РЕО при 3 кВ/мм.

О. Erol и др. развили область применения электропроводящих полимеров в качестве наполнителей электрореологических жидкостей [58]. Политрифениламин (РТРА) и его производное, функционализированное карбоновой кислотой (РТРА-СООН), были рассмотрены для получения более эффективных жидкостей. Аналоги ПАНИ на основе трехмерных сопряженных микропористых полимеров имеют богатую азотом пористую иерархическую структуру, низкую плотность и подходящую проводимость, а отсутствие необходимости дедопирования полимеров в отличие от ПАНИ делает их более привлекательными. Частицы РТРА проявляют достаточно высокую электрореологическую активность в дисперсии, которая дополнительно возрастает при функционализации. Статический предел текучести достигает ~220 и 375 Па для жидкостей с РТРА и РТРА-СООН при 10 масс. % и 3.5 кВ/мм соответственно. Оба материала демонстрируют стабильный отклик в режиме многократного стимулирования. Кроме того, более разветвленная поверхность частиц РТРА-СООН позволяет увеличить седиментационную устойчивость жидкостей.

Исследование *E.S. Kelbysheva и др.* посвящено особому классу электрореологических жидкостей, чувствительных к ультрафиолетовому облучению [59]. Авторы использовали фоточувствительные полиимиды на основе 4,4'-(гексафторизопропилиден) дифталевого ангидрида и 2,5-диаминобензолсульфоновой кислоты, а также в форме её натриевой соли. Для исследования одновременного влияния электрического поля и облучения на реологические свойства жидкостей была разработана специальная капиллярная ячейка. Влияние внешних стимулов оценивали по изменению времени истечения жидкости из капилляра. Обнаружено, что реологический отклик как на действие электрического поля, так и облучения, проявляет жидкость с наполнителем в форме натриевой соли. Качественно полученные зависимости подтверждаются при измерениях на стандартном реометре. Исследование демонстрирует перспективность применения фоточувствительных полиимидов для создания «умных» материалов и может дать начало развитию и исследованию нового направления.

S. Jekal и др. предложили использовать в качестве наполнителей перовскиты с различными галогенидами [60]. В исследовании рассмотрены перовскитные структуры типа ABX_3 , которые могут

существовать в различных фазах (Рис. 3а), где А — катионы цезия, формамидиния (FA) и метиламмония (MA), В — катион свинца и X — анионы галогенидов — бромид и иодид. Несмотря на невысокие значения предела текучести жидкостей в электрическом поле (< 10 Па при 3 кВ/мм и концентрации 3 масс. %), с большинством рассмотренных наполнителей (кроме $CsPbI_3$), в исследовании удалось выявить тенденцию к повышению эффекта в структурах, содержащих иодид в качестве аниона. Отметим, что частицы этих наполнителей обладают близкой морфологией неправильной формы с размерами в диапазоне нескольких микрометров с достаточно большой полидисперсностью (Рис. 3б—3е). Частицы $CsPbI_3$, в свою очередь, обладают игольчатой морфологией с высоким характеристическим отношением длины к толщине (L/D) порядка 10 (Рис. 3ж). Причины отличия морфологии в исследовании не обсуждаются, однако отмечается, что именно особенности морфологии частиц определяют разительное отличие свойств электрореологических жидкостей с этим типом перовскита. Для выявления роли анизотропии в электрореологическом поведении наполнителей авторам удалось получить частицы $CsPbI_3$ с характеристическими отношениями 5, 10 и 20. Предел текучести жидкостей при 3 масс. % достигает 71.0, 99.4 и 128.0 Па при напряженности поля 3 кВ/мм. Высокая анизотропия частиц также обуславливает их повышенную седиментационную устойчивость в силиконовом масле. Более детально исследования, посвященные роли формы частиц и применению анизотропных наполнителей в электрореологических жидкостях, рассмотрены далее.

Роль формы, размера и структуры

Создание низкоконтрированных жидкостей связано с использованием высокопористых наполнителей, а также частиц с высоким характеристическим отношением. В этом контексте полимеры представляют особый интерес ввиду возможности направленного варьирования надмолекулярной структуры и морфологии частиц. Так, ранее были получены электрореологические жидкости, наполненные высокопористыми микрочастицами хитозана, которые получали из раствора методом распыления и сублимационного высушивания [61]. Дисперсии таких частиц в силиконовом масле проявляют высокий электрореологический эффект с пределом текучести порядка 540 Па при напряженности электрического поля 7 кВ/мм и концентрации наполнителя всего 1 масс. %. Химическая модификация полимера или допирование пористой частицы позволяют изменять электрические характеристики наполнителя и, как следствие, электрореологический отклик жидкостей [62, 63]. Такой подход получил развитие при формировании композиционного высокопористого

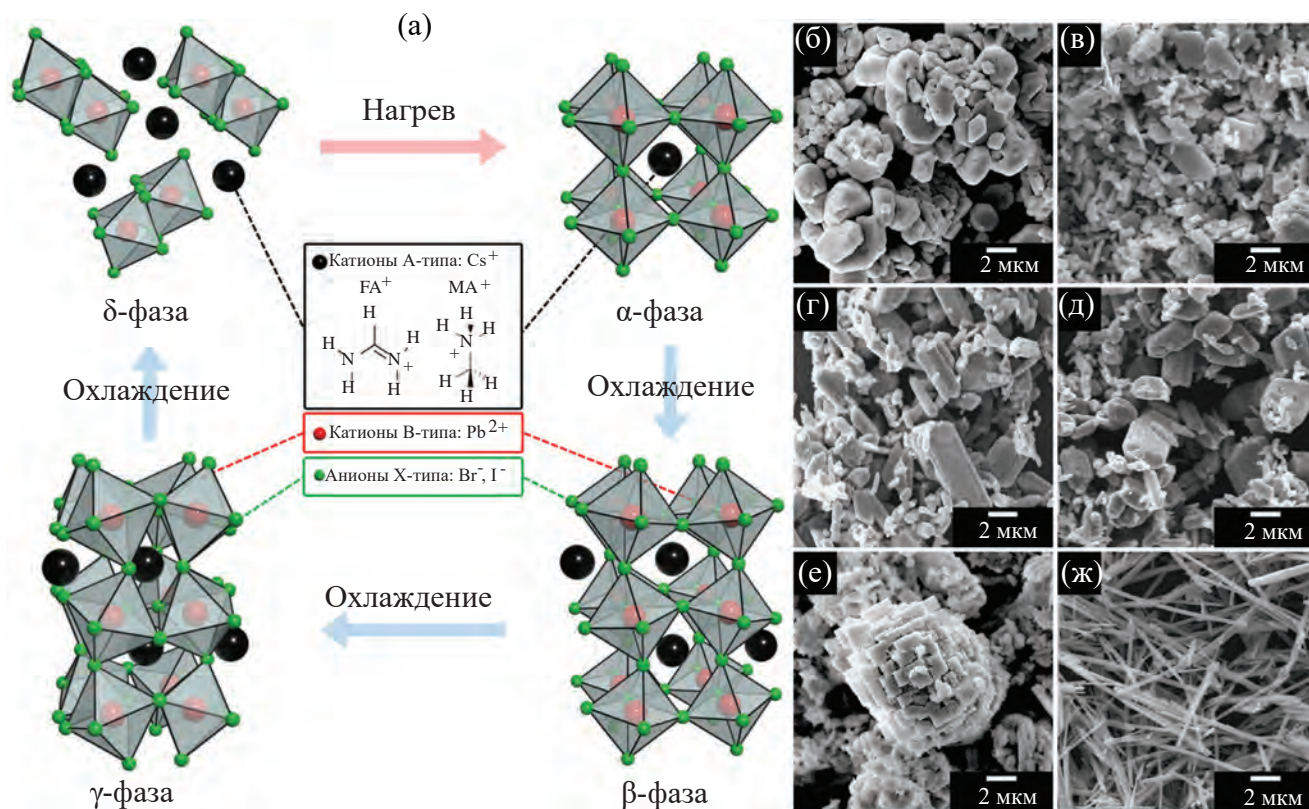


Рис. 3. Схематическая иллюстрация различных фаз галогенидных перовскитных материалов с формулой ABX_3 (а) и типичная морфология частиц полученных материалов $FAPbBr_3$ (б), $FAPbI_3$ (в), $MAPbBr_3$ (г), $MAPbI_3$ (д), $CsPbBr_3$ (е), $CsPbI_3$ (ж). Адаптировано из работы [60]. Copyright © 2025, American Chemical Society (Open Access).
Fig.3. Schematic illustration of various phases of halide perovskite materials with the formula ABX_3 (a) and typical particle morphology of the obtained materials $FAPbBr_3$ (b), $FAPbI_3$ (c), $MAPbBr_3$ (d), $MAPbI_3$ (e), $CsPbBr_3$ (f), $CsPbI_3$ (g). Adapted from [60]. Copyright © 2025, American Chemical Society (Open Access).

наполнителя из наностержней целлюлозы с применением полиэтиленгликоля в качестве связующего (Рис. 4а) [64]. Важно, что полиэтиленгликоль не обладает электрореологической активностью, а для формирования высокопористых микрочастиц достаточно всего 1 масс. % относительно массы целлюлозы. Предел текучести суспензии достигает 450 Па при 7 кВ/мм и 1 масс. % содержания наполнителя. Отличительной особенностью таких жидкостей является невероятно высокая седиментационная устойчивость за счет проницаемости частиц дисперсионной средой и формирования коллоидной структуры (Рис. 4в). Кроме того, в исследовании показана роль формы наполнителя в электрореологическом поведении жидкостей. Жидкости с высокопористыми частицами демонстрируют более высокий электро-реологический отклик по сравнению с дисперсиями, наполненными целлюлозными наностержнями, эффективность которых, в свою очередь, выше относительно микрочастиц (Рис. 4б). Подобная тенденция подтверждается при замене дисперсионной среды на оливковое масло [65].

S.D. Fernández-Silva и др. визуализировали структуру дисперсий наночастиц целлюлозы с высоким характеристическим отношением в касторовом масле *in situ* в процессе электро-реологических осцилляционных испытаний [66]. В исследовании отражено формирование ориентированных колончатых структур в дисперсии под действием электрического поля при низкой концентрации наполнителя (1 масс. %) и наглядно продемонстрирован баланс гидродинамических и поляризационных сил: при малой скорости сдвига (0.1 c^{-1}) структуры наклоняются и смещаются, однако сохраняют целостность во всем исследуемом диапазоне напряженностей электрического поля (до 4 кВ/мм), при высокой скорости сдвига (30 c^{-1}) и низкой напряженности поля (0.16 кВ/мм) структура нарушается и перколяция между верхней и нижней измерительной пластиной отсутствует. При увеличении концентрации частиц до 4 масс. %, поляризованные частицы образуют более сложные, разветвленные структуры, которые слабо смещаются при сдвиговом воздействии. Исследование дает ценную информацию не только об управлении

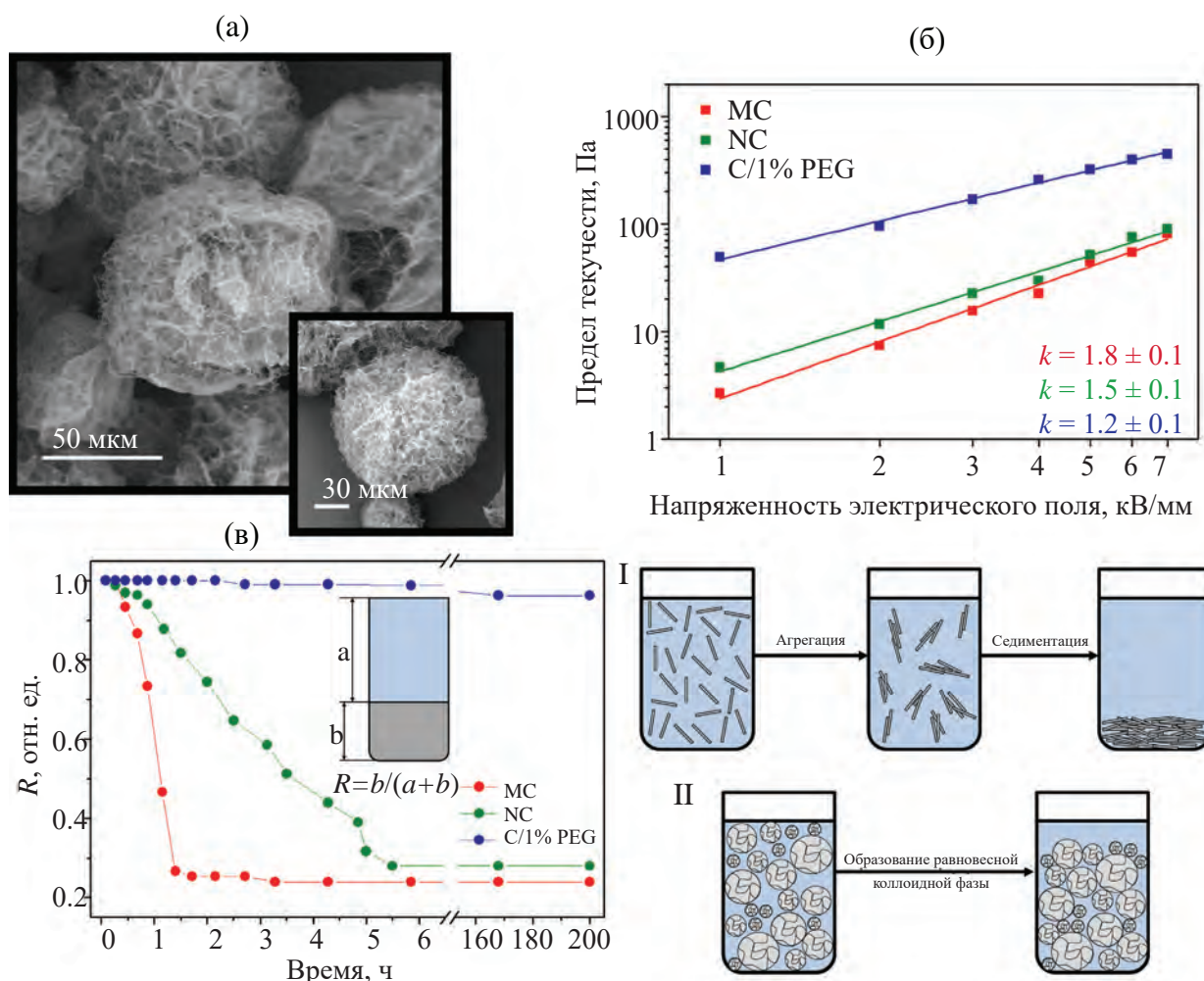


Рис. 4. Типичная морфология высокопористых композиционных частиц наностержней целлюлозы с полиэтиленгликолем состава 99/1 (C/1% PEG) (а). Зависимости значений предела текучести жидкостей (1 масс. %), наполненных частицами микроцеллюлозы (MC), наноцеллюлозы (NC) и C/1% PEG при различной напряженности электрического поля (б), анализ седиментационной устойчивости жидкостей и схематическая иллюстрация, объясняющая различия седиментационной устойчивости для частиц NC и MC (I) и C/1% PEG (II). Адаптировано из работы [64]. Copyright © 2024, Springer Nature.

Fig. 4. Typical morphology of highly porous composite particles of nanoradged cellulose with polyethylene glycol composition 99/1 (C/1% PEG) (a). Dependence of the values of the yield stress of fluids (1 wt %) filled with particles of microcellulose (MC), nanocellulose (NC) and c/1% PEG at different electric field strengths (b), an analysis of the sedimentation stability of fluids and a schematic illustration explaining the differences in sedimentation stability for NC and MC (I) particles and C/1% PEG (II). Adapted from [64]. Copyright © 2024, Springer Nature.

ориентацией целлюлозных нановолокон в жидких диэлектрических средах, но также демонстрирует особенности применения наполнителей с высоким характеристическим отношением для минимизации порога перколяции и разработки жидкостей с контрастным изменением свойств.

Тем не менее частицы природных полисахаридов полидисперсны, и исключить влияние размера наряду с анизотрией при исследовании

электрореологических свойств жидкостей невозможно. Поэтому *Y. Wang и др.* синтезировали моносферные эллипсоидные частицы на основе P[MTMA][TFSI] [67]. Оригинальность подхода к получению частиц заключается в формировании пленки поливинилового спирта, наполненной сферическими частицами PIL, и ее последующей одноосной вытяжке выше температуры стеклования. После охлаждения поливиниловый спирт растворяли в воде,

а полученные частицы отделяли центрифугированием. Характеристическое отношение получаемых таким образом монодисперсных частиц регулируется за счет степени вытяжки пленки и составляет 1.0, 1.9, 2.8, 4.5 и 7.3 при размерах частиц в несколько микрометров (< 10 мкм). Известно, что частицы с высоким характеристическим отношением в электрическом поле должны ориентироваться длинной стороной вдоль силовых линий [68, 69]. Ожидаемо, электрореологический отклик жидкостей возрастает с ростом характеристического отношения частиц наполнителя, что ведет к их преимущественной ориентации, поскольку поляризация вдоль длинной оси доминирует, а интенсивность максимума релаксации на диэлектрическом спектре возрастает. Интересно отметить, что жидкости, наполненные частицами с небольшим характеристическим отношением 1.9, обладают более низким электрореологическим эффектом и седиментационной устойчивостью, даже по сравнению со сферическим наполнителем. Наблюдаемые особенности авторы объясняют отсутствием строгой ориентации таких частиц в электрическом поле за счет близких значений поляризации и релаксации вдоль длинной и короткой оси, поэтому для формирования колончатой структуры требуется больше частиц даже по сравнению со сферическим наполнителем. Таким образом, плотность и прочность цепочек уменьшаются.

J. Yuan и др. исследовали влияние размера микросфер полиионной жидкости P[MTMA][TFSI] на электрореологические свойства дисперсий [70]. Обнаружено, что с увеличением размера частиц от 0.72 до 4.40 мкм приводит к снижению напряжения сдвига суспензий (20 об. %) без электрического поля и наоборот к увеличению значений предела текучести в электрическом поле.

ПАНИ является проводящим полимером, электрические свойства которого можно регулировать за счет обратимых окислительно-восстановительных взаимодействий. Не смотря на достаточно большое число исследований, ПАНИ наряду с другими электропроводящими полимерами продолжает привлекать внимание исследователей в области электрореологии [71]. Способность ПАНИ к самоорганизации открывает возможности для получения частиц различной морфологии в процессе синтеза [72]. Поэтому роль формы частиц наполнителя в электрореологическом поведении жидкостей также была исследована на примере частиц ПАНИ. *J. Yuan и др.* синтезировали частицы ПАНИ псевдо-сферической, нановолокнистой и пластинчатой морфологии. Для получения пластинок использовали оксид графена в качестве матрицы-шаблона [73]. Однако авторы отмечают, что ввиду относительно толстой оболочки ПАНИ влияние ядра оксида графена на электрические и электрореологические свойства пренебрежимо мало. Значения предела текучести

10 об. % жидкостей уменьшаются в ряду наполнителей с морфологией нановолокна, нанопластинок и частиц неправильной формы как ~ 1300 , ~ 890 и ~ 235 Па при напряженности электрического поля 3 кВ/мм соответственно. Отметим, что в исследовании также проведено моделирование электрореологического поведения частиц различной морфологии и получено хорошее соответствие с экспериментом. Более подробно результаты моделирования будут рассмотрены ниже в соответствующем разделе.

В другом исследовании *C.P. Allais и др.* исследовали электрореологические свойства дисперсий частиц ПАНИ различной морфологии, стабилизированных гидроксиэтилцеллюлозой (HEC) [74]. Была получена серия наполнителей, депротонированных при различных значениях pH. Авторы отмечают повышенный электрореологический отклик дисперсий, содержащих частицы фибриллярной морфологии по сравнению со сферическим наполнителем. Было обнаружено, что присутствие небольшого количества адсорбированной воды на частицах снижает электрореологический эффект, что нетипично, поскольку ранее ряд исследований показал активационное действие малого количества воды. Максимальное значение предела текучести ~ 824 Па достигнуто для 15 масс. % суспензии предварительно осушенных нановолокна ПАНИ при напряженности электрического поля 3.2 кВ/мм. В исследовании также отмечается, что полые сферы поли(о-анилидин)а не проявляют электрореологического эффекта в виду низкой поляризуемости.

S. Liu и др. сообщают об армирующей роли добавки нановолокна при формировании колончатой структуры в электрическом поле [75]. В качестве электрореологических жидкостей использовали дисперсии частиц оксалата титанила бария, покрытого мочевиной, и оксалата железа (II), допированного TiO_2 , в силиконовом масле. В качестве добавки использовали полиэфирные (не полярные) и хлопковые (полярные) волокна. Результаты показывают, что под действием электрического поля волокна преобразуют одномерную цепочечную структуру частиц дисперсной фазы в двумерную сетчатую, что ведет к росту значений предела текучести. Отмечается, что подобный эффект упрочнения характерен только для полярных волокон. При добавлении 0.8 об. % хлопковых волокон в дисперсию частиц оксалата титанила бария (5 масс. %) под действием электрического поля 2 кВ/мм предел текучести увеличивается с 6.7 до 16 кПа. Для дисперсии оксалата железа (II), допированного TiO_2 , рост значений менее выражен и составляет от 0.4 до 0.55 кПа при тех же условиях.

S. Jekal и др. обсуждают влияние гелевого эффекта (порога перколяции) на электрореологическое поведение дисперсии [76]. В исследовании выдвинута гипотеза, что при концентрации наполнителя выше

порога протекания в электрическом поле происходит формирование дополнительных колончатых структур наряду с существующим перколяционным кластером, что приводит к формированию более прочной сетки из частиц наполнителя и, как следствие, более высоким значениям предела текучести. Экспериментально выдвинутое предположение было проверено на дисперсиях микрочастиц слюды (природной и синтетической) и стекла при различных концентрациях. Несмотря на невысокие значения предела текучести в электрическом поле для дисперсий исследуемых наполнителей (30.5, 516.2 и 134.2 Па при 3 кВ/мм и 30 масс. % соответственно), работа подчеркивает важную роль перколяционной сетки из частиц наполнителя при создании эффективных электрореологических жидкостей. При этом важно помнить, что контрастность изменения свойств жидкостей при стимулировании также определяется порогом перколяции и наличием предела текучести вне электрического поля.

J. Noh и др. получили особые, окрашенные электрореологические жидкости [77]. Цвет дисперсии (желтый, красный, фиолетовый и синий) зависит от толщины слоя диоксида титана на поверхности слюды, т.е. оптического пути световой волны и интерференции. Авторы отмечают, что для проявления окраски необходима достаточно гладкая поверхность частиц и однородная толщина покрытия. Для интенсификации окраски наполнители дополнительно допировали красителями соответствующего цвета. Такие жидкости, содержащие всего 3 масс. %, наполнителя обладают яркой окраской. Кроме того, краситель выполняет роль активирующей добавки и приводит к интенсификации электрореологического эффекта. В частности, для жидкости с наполнителем желтого цвета предел текучести достигает 118.2 Па при 3 кВ/мм по сравнению с 42.1 Па для дисперсии частиц без красителя. Повышение интенсивности окраски и электрореологического отклика демонстрирует потенциал таких жидкостей с широким диапазоном ярких цветов. Дополнительные цветовые опции позволяют генерировать двойные сигналы (изменение предела текучести и цветового тона) во время стимулирования, что открывает новые возможности для практических приложений.

Таким образом, представленные исследования показывают перспективность подходов к поверхностной и структурной модификации наполнителей для усиления электрореологического отклика, повышения устойчивости и стабильности функционирования. Важным фактором, определяющим свойства жидкостей, является форма частиц наполнителя, что было показано в ряде исследований на частицах различной природы. Основные параметры рассмотренных жидкостей суммированы в Таблице 1. Анализируя

данные таблицы, можно отметить, что большинство материалов функционируют в ограниченном диапазоне напряженностей электрического поля до 3 кВ/мм. Относительная эффективность жидкостей существенно варьирует в зависимости от концентрации частиц и наличия предела текучести вне электрического поля. Для ряда систем контрастность изменения свойств достигает 5 порядков. Кроме того, в некоторых исследованиях не указана вязкость используемого масла, что затрудняет верификацию результатов и сравнительный анализ материалов.

ЖИДКОСТИ С ДВОЙНЫМ ОТКЛИКОМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ/МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Существенные перспективы в области «умных» жидкостей связаны с материалами, обладающими двойным откликом на действие как электрического, так и магнитного поля [78–81]. В последние годы появляется все больше исследований, посвященных этому феномену. Возможность такого двухфакторного управления достигается за счет комбинации в структуре наполнителя как минимум двух компонент, одна из которых чувствительна к электрическому полю, а другая к магнитному.

Так, *C.H. Hong и др.* синтезировали частицы магнетита (смешанного оксида железа (II, III)), покрытого полииндолем (**PIn**) со структурой ядро–оболочка [82]. Электропроводящая оболочка PIn обуславливает электрореологический отклик частиц в дисперсии, тогда как ядро магнетита является магниточувствительным компонентом и отвечает за магнитореологический эффект. Предел текучести жидкости при содержании наполнителя 10 об. % достигает 13 и 340 Па при 2.5 кВ/мм и 420 кА/м соответственно.

Позднее *S. Wang и др.* синтезировали другой тип частиц со структурой ядро–оболочка на основе магнетита и поли-*N*-метиланилина (**PNMA**) [83]. Особенностью исследования является получение частиц через эмульсию Пикеринга, то есть поли-*N*-метиланилин выступает в качестве ядра, а частицы Fe_3O_4 находятся в оболочке. Такой подход позволил получить жидкость с более высоким пределом текучести в электрическом поле по сравнению с магнитным. Максимальные значения при 10 об. % содержании составили ~127 и ~39 Па при 2.5 кВ/мм и 171 кА/м соответственно.

J.Y. Jeong и др. использовали феррит марганца в качестве магниточувствительного ядра, на котором формировали оболочку из ПАНИ [84]. Полученные сферические частицы с шероховатой поверхностью диспергировали в силиконовое масло при концентрации 5 об. %. Дисперсия проявляет двойной отклик на действие электрического и магнитного поля, а максимальные значения

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик электрореологических жидкостей. Используемые в таблице сокращения и условные обозначения приведены в соответствующем разделе

Table 1. Comparative analysis of the characteristics of electrorheological fluids. The abbreviations and symbols used in the table are given in the corresponding section

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , мА/см ²	Предел текучести при E_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эф.}$, отн. ед.
Карбонизированная Glu [37]	—	Сферические ~400–500 нм	~0.6	5 масс. %	2.36	1	439.7	~180*	—	~97	36000
		Сферические со структурой ядро – оболочка ~400–500 нм, плотная оболочка толщиной несколько нм	—		0.82	2	813.1	~60*	1.57	~51	390
Glu@SiO ₂ [37]	—	Сферические со структурой ядро – оболочка ~400–500 нм, пористая оболочка 20–30 нм	—	—	1.21	3	0.3	~90	1.50	~63	390
		Сферические со структурой ядро – оболочка ~400–500 нм, пористая оболочка 20–30 нм	—		1.21	3	0.3	~90	1.50	~63	390
ВТО@NCs [38]	Силиконовое масло 50 мПа · с	Сферические со структурой ядро – оболочка ~50–100 нм	~4.6	12 об. % (39.5 масс. %)	3.09	4	—	~350	—	—	3000
					3.25	4		~600			5100
					4.30	3		~620			5200
NCs@TiO ₂ [39]	Силиконовое масло 65 сСт	Сферические со структурой ядро – оболочка 520 нм, оболочка 30–40 нм	2.35	7 масс. %	3.86	3	—	~400	2	—	13000
					—			~1500			160
					—			~5000			280
GL-Plate [40]	Силиконовое масло 100 сСт	Пластинчатая, длиной несколько десятков мкм, толщиной 1.3 мкм	—	3 масс. %	—	4	—	3.5	—	24	30
		Пластинчатая со структурой ядро – оболочка, длиной несколько десятков мкм, толщиной 1.5 мкм						25.5		35	270
HL-Plate@TiO ₂ [40]	Силиконовое масло 100 сСт	Пластинчатая полая, длиной несколько десятков мкм, толщина стенки 160 нм	—	3 масс. %	—	4	—	75.1	—	63	820
MOF-Ti@PANI [42]	Силиконовое масло (диметилсилоксан) 500 сСт	Частицы квадратной (кубической морфологии) размером 100–200 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки 17–20 нм	0.963	10 масс. % (9.40 об. %)	—	3	19.75	~200	0.84	—	660
			0.976	10 масс. % (9.29 об. %)	0.48	—	58.23	~200	1.18	—	660

Таблица 1. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_j$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , $\mu A/cm^2$	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$ отн. ед.**
0.25			0.981	10 масс. % (9.25 об. %)	—		62.39	~220	1.19		730
0.30			0.983	10 масс. % (9.23 об. %)	0.69		53.03	~130	1.46		430
0.35			0.991	10 масс. % (9.16 об. %)	—		93.59	~200	1.09		330
0.40			1.003	10 масс. % (9.07 об. %)	—		51.99	~130	0.93		430
MOF-Ti@ SiO ₂ [43]	Силиконовое масло (диметилсилоксан) 500 сСт	Частицы близкие к сферическим с шероховатой поверхностью и структурой ядро-оболочка размером 200–400 нм, толщина оболочки 20–30 нм	—	10 масс. %	—	3	>0.1	~272	1.05	96	2300
MOF-Ti@ MoS ₂ @ SiO ₂ [44]	Силиконовое масло (диметилсилоксан)	Частицы ромбовидной формы с шероховатой поверхностью и структурой ядро-оболочка размером 0.5–1 мкм	—	10 масс. %	0.52	2.5	74.84	~150*	1.50	~90	1500
0.1–1.5					—		50.93	~160*	1.53		2100
0.1–2					0.70		77.95	~180	1.51		1700
0.15–2					—	3.0	31.18	~180	1.57		1700
0.2–2					—		43.65	~150	1.47		1700
MOF-Ti@ La [45]	Силиконовое масло (диметил-силоксан)	Частицы близкие к сферическим переходящие в квадратные с увеличением размера от 0.2 до 2 мкм с ростом количества допанта	—	10 масс. %	1.00		15.59	~300	—	100	600
Количество добавленного La(NO ₃) ₃ ·nH ₂ O: 30 мг					—	2.5	32.22	~350	—	—	700
40 мг					—		99.78	~150	—	—	400
50 мг					0.66		55.08	~110	—	—	400
75 мг					0.64	2.0	>100	~150	—	92	750
100 мг											

Таблица 1. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , $\mu A/cm^2$	Предел текучести при E_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$ отн. ед. **
P[MTMA][TFSI] [124]	Силиконовое масло 50 сСт	Сферические частицы диаметром 1,02 мкм	1.62	15 об. % (~22.8 масс. %)	5.6	3	~40	~390	—	—	160
		Сферические частицы диаметром 1.25 мкм	1.81	15 об. % (~24.8 масс. %)	0.18		<1	~35			6
		Сферические частицы диаметром 0.98 мкм со структурой ядро—оболочка, толщина оболочки 55 нм	1.68	15 об. % (~23.2 масс. %)	1.9		~5	~265			130
P[MTMA][TFSI] [47]	Силиконовое масло (диметил-силоксан) 50 сСт	Сферические частицы диаметром 2—3 мкм	1.56	20 об. % (28.7 масс. %)	3.60	3	—	702	1.55	—	80
P[MTMA][TFSI]-HMA [47]			1.51	20 об. % (28.0 масс. %)	3.82			750	1.52		90
P[MTMA][PF ₆] [47]			1.42	20 об. % (26.8 масс. %)	3.05			310	1.64		40
P[MTMA][PF ₆]-HMA [47]	1.38		20 об. % (26.2 масс. %)	2.90	190			1.84	20		
[BCNIm][TFSI] [49]	Силиконовое масло 50 сСт	Частицы неправильной формы размером <3—5 мкм	—	20 об. %	~2.7	3	~200	~545	1.04	—	360
					~4.7		~52	~1730	1.60		1400
					~5.3		~70	~1590	1.62		660
Poly-LiTB [50]	Силиконовое масло 1 Па · с	Частицы неправильной формы размером <20 мкм	—	10 масс. % 15 масс. % 20 масс. % 25 масс. % 10 масс. % 15 масс. % 20 масс. % 25 масс. %	0.57 1.00 1.32 1.60 0.66 1.22 1.25 1.35	2	~80	~1230	1.48	680	
					~110*		1.60	—	270		
					~120*		1.75	—	200		
Poly-NaTB [50]	Силиконовое масло 1 Па · с	Частицы неправильной формы размером <20 мкм	—	10 масс. % 15 масс. % 20 масс. % 25 масс. % 10 масс. % 15 масс. % 20 масс. % 25 масс. %	0.66 1.22 1.25 1.35	2	~300*	~1230	1.42	120	
					~80*		1.33	—	130		
					~105*		1.16	—	110		
ПАНИ-графт-хитозан [51]	Силиконовое масло 1 Па · с	Частицы неправильной формы размером 100 нм	0.92	15 об. % (14.4 масс. %)	1.25 1.35	3	~210*	~1230	1.50	84	
					1.48		—	60			
					1.5		76	70			

Таблица 1. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{\text{ж}}$, отн. ед.	$E_{\text{тж}}$, кВ/мм	$J_{\text{тж}}$, $\mu\text{А}/\text{см}^2$	Предел текучести при 3 кВ/мм или при $E_{\text{тж}}$, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R , %	$K_{\text{эфф.}}$ отн. ед. **	
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ [52]	Силиконовое масло 350 сСт	Частицы близкие к сферическим	4.13	15 масс. % (4 об. %)	6.50	1.5	1.42×10^{-3}	~33	—	—	25	
			4.05		7.40	4	9.77×10^{-4}	~166	2.69 (<2 кВ) 1.70 (>2 кВ)	69	180	
			4.04		3.25		9.70×10^{-4}	~177	2.19 (<2 кВ) 1.61 (>2 кВ)	71	190	
			4.04		3.89		9.36×10^{-4}	~170	1.90 (<2 кВ) 1.60 (>2 кВ)	76	190	
Гётит [53]	Силиконовое масло (полидиметил-силоксан) 50 сСт	Пластины длиной 500—800 нм, шириной 130—170 нм и толщиной 20 нм, содержание мочевины 6.8 масс. %	4.2	5 об. % (18.7 масс. %)	—	5	0.32	~205	1.9 (<3 кВ) 1.2 (>3 кВ)	—	3700	
				9 об. % (30.2 масс. %)			23.22	~900	2.3 (<3 кВ) 1.4 (>3 кВ)		9900	
				5 об. % (18.7 масс. %)			0.13	~130	1.2		2300	
				7 об. % (24.8 масс. %)			31.79	~670	1.8		9000	
ММТ [57]	Силиконовое масло (диметил-силоксан, KF-96) 50 сСт	Стопка пластин с межслоевым расстоянием 1.26 нм	2.51	15 об. % (31.6 масс. %)	~3.17	1	62	~35*	—	—	110	
		Стопка пластин с межслоевым расстоянием 1.71 нм, содержание РЕО 13 масс. %	2.12	15 об. % (28.0 масс. %)	~1.42	3	0.31	~92			6	
РТПА [58]	Силиконовое масло (диметилсилоксан) 1 Па · с	Сросшиеся наночастицы мкм размеров	0.88	2.5 масс. %	—	3.5	<0.03	~25	0.9	~32	320	
				5 масс. %	—			~65	1.1	~50	210	
				7.5 масс. %	—			~100	1.2	~80	110	
			0.91	10 масс. %	1.55			~170	1.4	87	140	
РТПА-СООН [58]				2.5 масс. %	—			~70	1.3	~68	920	
				5 масс. %	—			~140	1.5	~94	930	
				7.5 масс. %	—			~225	1.5	~98	500	
				10 масс. %	1.88			~300	1.6	99	500	

Таблица 1. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , $\mu A/cm^2$	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Наклон $\log(t_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$ отн. ед.**		
FAPbBr ₃ [60] FAPbI ₃ [60] MAPbBr ₃ [60] MAPbI ₃ [60] CsPbBr ₃ [60] CsPbI ₃ [60]	Силиконовое масло 100 сСт	Частицы неправильной формы размером <20 мкм	—	3 масс. %	0.47	3	—	3.6	—	~18	15		
					0.63			5.8	—	~15	30		
		Высокоанизометричные стержни длиной ~10 мкм ($L/D > 10$)			0.64			4.0	—	~38	20		
					0.74			4.4	—	~48	40		
					0.69			5.0	—	~20	25		
NC [64]	Силиконовое масло (полидиметилсилоксан) 100 сСт	Высокоанизометричные стержни длиной 100 ± 20 нм ($L/D = 16 \pm 2$)	—	1 масс. %	—	7	—	23	1.5	28	7500		
MC [64]		Частицы неправильной формы размером 34 ± 12 мкм ($L/D = 3 \pm 1$)						16	1.8	24	5200		
C/1% PEG [64]		Сферические высокопористые частицы с высокой полидисперсностью и наиболее вероятным размером 70 мкм						170	1.2	96	1800		
NC [65] MC [65]	Оливковое масло 80 мПа·с	Высокоанизометричные стержни длиной 100 ± 20 нм ($L/D = 16 \pm 2$)	—	1 масс. %	0.22	6	<4	110	1.2	20	37000		
		Частицы неправильной формы размером 34 ± 12 мкм ($L/D = 3 \pm 1$)			0.03	7	0.25	65	2.2 (<3 кВ) 0.9 (>3 кВ)		22000		
P[MTMA] [TFSI] [67] L/D: 1	Силиконовое масло (диметилсилоксан, KF-96) 50 сСт	Монодисперсные сферические частицы диаметром 3.1 мкм	1.62	1 об. %	~0.06	3	—	~24	—	—	4700		
				2.5 об. %	~0.51			~71		—	5600		
				5 об. %	~0.58			~100		~29	4000		
				7.5 об. %	~0.84			~147		—	4000		
				10 об. %	~1.3			~183		—	3800		
				15 об. %	~2.2			400		—	5800		

Таблица 1. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , мА/см ²	Предел текучести при E_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф}$, отн. ед. **
1.9		Монодисперсные эллипсоидные частицы длиной ~4.75 мкм и диаметром ~2.5 мкм		1 об. %	~0.06			~24		—	4700
				2.5 об. %	~0.45			~71		—	5600
				5 об. %	~0.52			~111		~27	4500
				7.5 об. %	~0.96			~128		—	3500
				10 об. %	~1.3			~168		—	3500
2.8		Монодисперсные эллипсоидные частицы длиной ~6.0 мкм и диаметром ~2.1 мкм		15 об. %	~2.3			392		—	5600
				1 об. %	~0.08			~24		—	4700
				2.5 об. %	~0.52			~71		—	5600
				5 об. %	~0.69			~100		~32	4000
				7.5 об. %	~1.2			~128		—	3500
4.5		Монодисперсные эллипсоидные частицы длиной ~8.5 мкм и диаметром ~1.9 мкм		10 об. %	~1.4			~317		—	6600
				15 об. %	~2.6			~563		—	8100
				1 об. %	~0.15			~55		—	11000
				2.5 об. %	~0.68			~111		—	8800
				5 об. %	~0.90			~159		~41	6400
7.3		Монодисперсные эллипсоидные частицы длиной ~10.2 мкм и диаметром ~1.4 мкм		7.5 об. %	~1.6			~218		—	6000
				10 об. %	~2.1			~420		—	8800
				15 об. %	~3.5			~748		—	11000
				1 об. %	~0.14			~95		—	19000
				2.5 об. %	~0.72			~193		—	15000
				5 об. %	~1.2			~273		~54	11000
				7.5 об. %	~2.3			~430		—	12000
				10 об. %	~3.0			~920		—	19000
				15 об. %	~5.2			1160		—	17000

Таблица 1. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя			ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$ отн. ед. **
P[MTMA] [TFSI] [70]	Силиконовое масло	Монодисперсные сферические частицы	4.40 ± 0.85 мкм	1.62	20 об. % (29.5 масс. %)	—	3	—	—	~930	1.45	—	170
			1.41 ± 0.20 мкм							~660	1.50		110
			0.72 ± 0.15 мкм							~460	1.40		35
ПАНИ [73]	Силиконовое масло (диметилсилоксан, KF-96) 50 сСт	Агрегаты частиц неправильной формы размером 0.5–1 мкм	1.3	10 об. % (11.6 масс. %)	2.20	3	—	—	~235	—	—	340	
		Нанопластины диаметром 150–200 нм и длиной 1–3 мкм			2.21				~1300			370	
		Нанопластины толщиной 80–100 нм длиной 1–3 мкм (оскид графена использовали в качестве матрицы–шаблона)			2.06				~890			730	
ПАНИ - НЕС [74]	Силиконовое масло (полиди-метилсилоксан)	Нанопластины 100 нм в ширину и 500 нм в длину (с небольшим содержанием воды)	—	15 масс. %	—	2.8	—	—	599*	—	—	14000	
		Нанопластины 100 нм в ширину и 500 нм в длину (высушенные)				3.2			824*			17000	
		Сферические частицы диаметром 80 нм				3.0			120			4000	
BaTiO(C ₂ O ₄) ₂ /NH ₂ CONH ₂ [75]	Силиконовое масло	Сферические частицы диаметром 50–70 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки 3–10 нм	Содержание волокон (хлопок): 0 об. % 0.2 об. % 0.4 об. % 0.8 об. %	—	5 масс. %	—	2	~2.3	6700*	—	—	45*10 ⁴	
									~6.2			~11700*	58*10 ⁴
									~7.6			~13000*	32*10 ⁴
									~11.3			16000*	40*10 ⁴

Таблица 1. Окончание

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{\text{ж}}$, отн. ед.	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Предел текучести при E_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R , %	$K_{\text{эфф}}$, отн. ед.**
FeC ₂ O ₄ /TiO ₂ [75]		Частицы близкие к сферическим размером несколько мкм с нерегулярной поверхностью из наночастиц TiO ₂						400*			1900
											1800
											1700
											1600
											11
Природная слюда [76]	Силиконовое масло 100 сСт	Частицы пластинчатой морфологии	—	30 масс. %	—	3	—	30.5	—	—	200
Синтетическая слюда [76]											52
Стекло [76]											2400
Слюда покрытая TiO ₂ [77]		Частицы пластинчатой морфологии размерами ~10–25 мкм, толщиной ~1 мкм с различной толщиной обложки TiO ₂ и красителя	—	3 масс. %	—	3	—	42.1	1.5	—	7200
											3500
											4300
											5000
											7000
											6600
											11000

где ρ — плотность наполнителя, $\Delta\epsilon_{\text{ж}}$ — сила диэлектрической релаксации жидкости ($\Delta\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_{\infty}$; где ϵ_0 и ϵ_{∞} диэлектрическая проницаемость в низко- и высокочастотном пределе, соответственно), E_{max} — наибольшая эксплуатационная напряженность электрического поля, не приводящая к пробую, J_{max} — максимальное значение тока утечки, R — равновесное седиментационное отношение высоты столба коллоидной фазы к высоте столба всей жидкости.

* значения указаны при максимальной напряженности электрического поля.

** $K_{\text{эфф}}$ — относительная эффективность, рассчитанная как $K_{\text{эфф}} = (\tau_E - \tau_0)/(\tau_0 E_{\text{отн}} \omega)$, где τ_E (Па) — предел текучести под действием электрического поля 3 кВ/мм или при E_{max} , τ_0 (Па) предел текучести вне электрического поля, $E_{\text{отн}}$ (отн. ед.) — нормированная напряженность электрического поля (на 1 кВ/мм), ω (отн. ед.) — доля наполнителя. Значения рассчитаны для напряженности электрического поля 3 кВ/мм, за исключением жидкостей с меньшей предельной напряженностью поля. Различия между массовым и объемным содержанием наполнителя не учитывали, во всех случаях где это возможно для расчетов использовали массовую концентрацию. Если τ_0 в исследовании не указано, для расчета использовали значение 0.1 Па.

Для определения некоторых числовых параметров по графическим экспериментальным данным использовали программное обеспечение GetData Graph Digitizer (Informer Technologies, Inc.).

предела текучести составили ~140 и 17 Па при 2 кВ/мм и 171 кА/м соответственно.

Н. Gwon и др. допировали оксид графена наночастицами оксида гадолиния (III) для получения наполнителя, чувствительного к электрическому и магнитному полю в дисперсии [85]. Оксид графена получали из графита по модифицированному методу Хаммерса. Частицы Gd_2O_3 синтезировали путем термического разложения металл-олеатного комплекса. Для формирования композиционного наполнителя проводили осаждение наночастиц Gd_2O_3 на поверхность оксида графена через раствор тетрагидрофурана в воде путем отгонки органического растворителя. Соотношение Gd_2O_3 к оксиду графена в составе наполнителя варьировали по массе как 1 : 1, 1 : 2 и 1 : 3. Дисперсии частиц в силиконовом масле проявляют двойной отклик при концентрации всего 0.6 масс. %. При этом с увеличением содержания оксида графена в составе частиц значения предела текучести жидкостей в электрическом поле возрастают и при 4 кВ/мм достигают 90, 214 и 266 Па соответственно. Интересно отметить, что ввиду крайне низкой концентрации значения предела текучести не зависят от напряженности магнитного поля и составляют 1416, 1375 и 1288 Па для частиц указанного выше состава.

Международный коллектив авторов из Румынии и Чехии исследовали двойной отклик дисперсий частиц полипиррола (PPy) с наночастицами магнетита [86] и микрочастицами никеля [87]. Причем в первом случае ядром выступал электрочувствительный материал (PPy), а во втором магнитный (Ni). Авторы анализировали изменение сопротивления и проводимости жидкостей при последовательном приложении сонаправленных электрического и магнитного поля. Для проведения подобных исследований была разработана специальная плоскопараллельная ячейка типа «сэндвич» (Рис. 5а), которую далее помещали в экспериментальную установку, позволяющую анализировать электрические характеристики образца под действием электрического и магнитного поля высокой напряженности (Рис. 5б). При стимулировании в жидкости формируются колончатые структуры из частиц дисперсной фазы, что приводит к образованию проводящих путей и отражается в изменении сопротивления (и проводимости) материала. Одновременное сонаправленное действие электрического и магнитного поля приводит к синергетическому эффекту (Рис. 5в). Несмотря на то, что исследования не содержат типичных реологических характеристик материалов, результаты показывают возможность регулирования проводимости жидкостей как за счет действия электрических и магнитных полей, так и путем изменения состава наполнителя и его концентрации. Необычный взгляд на электро-/магнитореологический эффект открывает новые возможности для создания сенсоров и актуаторов.

Основные параметры рассмотренных жидкостей в сравнении с ранее полученными результатами [88–92] суммированы в Таблице 2. Анализ данных показывает, что чем больше электрочувствительной компоненты в составе наполнителя, тем сильнее отклик жидкости в электрическом поле, и, наоборот, если превалирует доля магниточувствительных частиц, то отклик на магнитное поле оказывается выше. Отметим, что рабочие диапазоны напряженностей поля, значения предела текучести и контрастность изменения свойств материалов также оказываются ниже относительно аналогов, реагирующих только на один тип прикладываемого поля (электрическое или магнитное). Тем не менее представленные исследования являются первыми шагами к созданию мультичувствительных жидкостей, управляемых различными стимулами, а предложенные способы получения гибридных частиц показывают перспективность подходов к созданию multifunctional наполнителей.

ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Теоретические основы электрореологического эффекта были детально изложены достаточно давно [10, 93, 94]. Основной движущей силой эффекта является формирование колончатых структур из частиц дисперсной фазы при их поляризации и взаимодействии в электрическом поле. При этом основной вклад вносит поверхностная межфазная поляризация частиц на границе раздела фаз. Таким образом, работает базовое правило: чем больше различие диэлектрической проницаемости наполнителя и среды, тем выше электрореологический эффект. Появление новых наполнителей и развитие представлений позволило выявить для ряда систем существенную роль проводимости компонентов наряду с диэлектрической проницаемостью. Открытие гигантского электрореологического эффекта и развитие направления исследований наполнителей со структурой ядро–оболочка, в том числе полых, обусловило появление моделей насыщения поверхностной поляризации, ориентации и связывания полярных молекул, и модели насыщенной ориентационной поляризации [95]. Важно подчеркнуть, что во всех случаях физическая природа эффекта остается единой и связана с поляризационными процессами. Тем не менее в последние годы также появляются новые теоретические работы. В связи с прогрессом в области вычислительной техники и кратным возрастанием вычислительных мощностей широкое применение получают методы математического моделирования.

Х. Li и др. рассмотрели классическую задачу взаимодействия двух диэлектрических сфер в однородном электрическом поле [96]. Оригинальность работы заключается в сравнении метода множественных изображений, включающего численный

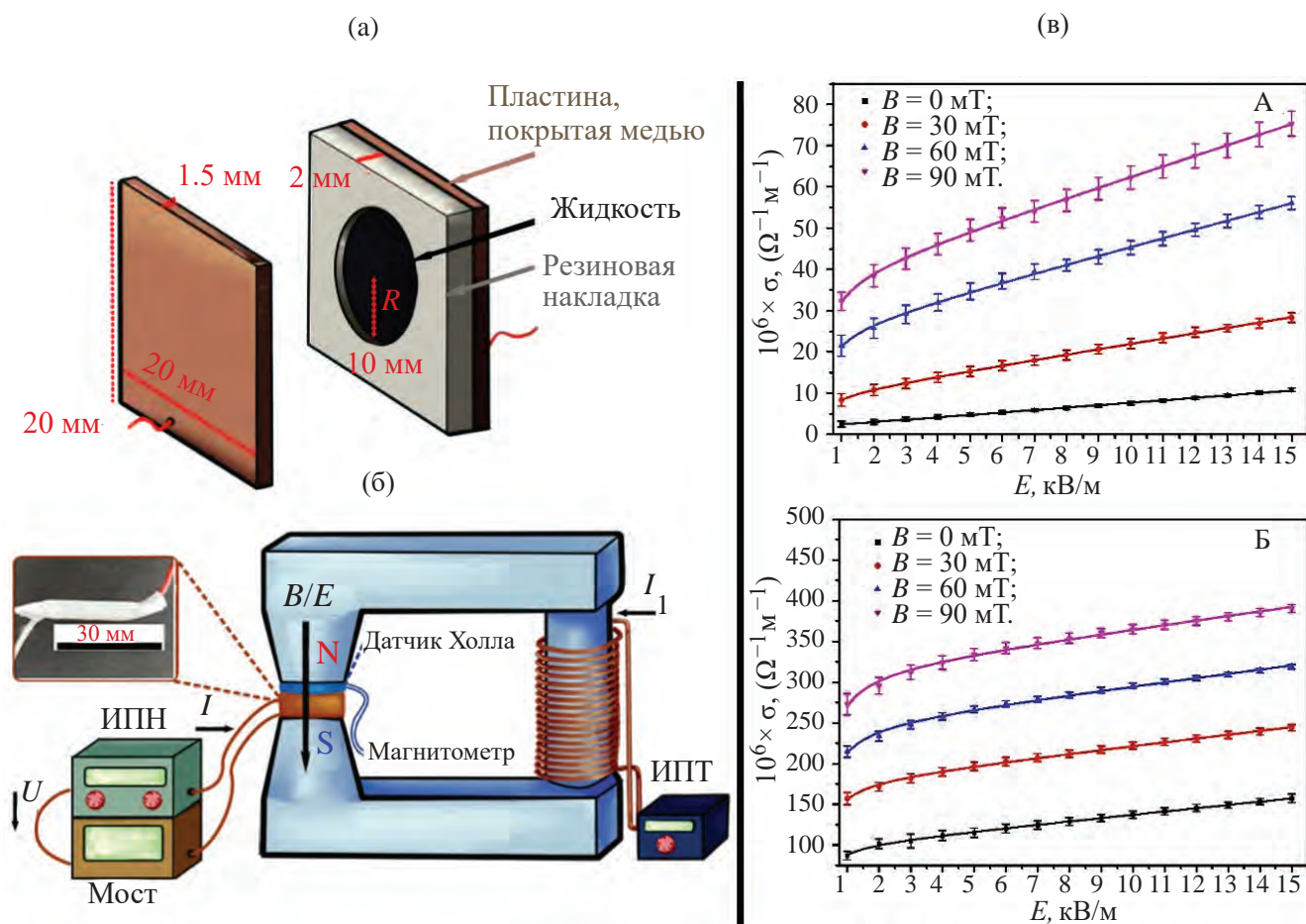


Рис. 5. Схематическая иллюстрация измерительной ячейки (а) и экспериментальной установки (б): магнитное поле создавали с помощью катушки от источника постоянного тока (ИПТ, I_1) и измеряли с помощью датчика Холла, электрическое поле прикладывали от источника постоянного напряжения (ИПН, U), измерительная ячейка (коричневый диск) подключена к ИПН, а ток (I), проходящий через образец, измеряли с помощью моста, направление магнитного/электрического поля указано на рисунке. Изменение электропроводности образцов от напряженности внешнего электрического поля при одновременном действии магнитного поля различной напряженности (в) для 50 об. % образцов жидкостей, наполненных частицами РРy/Ni с содержанием никеля 24.6 (А) и 33.3 масс. % (Б) соответственно. Точки – экспериментальные значения, линии – аппроксимация. Адаптировано из работы [87]. Copyright © 2025, The Royal Society of Chemistry.

Fig. 5. Schematic illustration of the measuring cell (a) and the experimental setup (b): a magnetic field was created using a coil from a direct current source (DCS, I_1) and measured using a Hall sensor, an electric field was applied from a constant voltage source (CVS, U), the measuring cell (brown disk) is connected to the CVS, and the current (I) passing through the sample was measured using a bridge, the direction of the magnetic/electric field is indicated in the figure. The change in the electrical conductivity of samples from the strength of an external electric field under the simultaneous action of a magnetic field of different strengths (v) for 50 vol. % of fluid samples filled with PPy/Ni particles with a nickel content of 24.6 (A) and 33.3 wt % (B), respectively. The points are experimental values, the lines are approximations. Adapted from [87]. Copyright © 2025, The Royal Society of Chemistry.

подход, с классической оценкой в приближении эффективного диполя. Размеры сфер были заданы 3.15 мкм, расстояние между ними составляло 0.5 мкм. В методе множественных изображений начальные дипольные моменты каждой сферы, индуцируемые внешним однородным электрическим полем, представлены в виде пары эффективных точечных

зарядов. Эти точечные заряды расположены в центрах сфер на расстоянии 10^{-4} м друг от друга. Суммарный заряд эквивалентен точечному заряду, расположенному в центре сферы. Взаимодействие сфер приводит к смещению зарядов, а расчет ведется итерационно. При достижении достаточного числа итераций для сохранения заряда внутри каждой сферы

Таблица 2. Сравнительный анализ характеристик жидкостей с двойным откликом на электрическое/магнитное поле. Используемые в таблице сокращения и условные обозначения приведены в соответствующем разделе

Table 2. Comparative analysis of the characteristics of fluids with a dual response to an electric/magnetic field. The abbreviations and symbols used in the table are given in the corresponding section

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	M_{η} , змУ/г	E_{max} , кВ/мм	H_{max} , кА/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Предел текучести при 100 кА/м или при H_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(H))$	R , %	$K_{эфф.}$ отн. ед. (E)	$K_{эфф.}$ отн. ед. (H)**
Fe ₃ O ₄ /PIIn [82]	Силиконовое масло	Сферические частицы диаметром 400 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки 45 нм	2.93	10 об. % (25.3 масс. %)	0.54	42.1	2.5	~420	~13*	~88	1.5	1.5	—	200	35
Fe ₃ O ₄ /ПАНИ [88]	Силиконовое масло (KF-96) 50 мПа·с	Сферические частицы со структурой ядро-оболочка размером ~1 мкм с шероховатой поверхностью, толщина оболочки ПАНИ несколько десятков нм, соотношение Fe ₃ O ₄ /ПАНИ составляет 63.91/33.84 масс. %	2.76	20 масс. %	—	38	2.5	342	144*	~48	1.5	2.0	~57	720	1
Fe ₃ O ₄ /PPU [89]	Силиконовое масло 100 сСт	Сферические частицы со структурой ядро-оболочка размером ~580 нм с шероховатой поверхностью, толщина оболочки PPU 60 нм, содержание Fe ₃ O ₄ составляет ~25 масс. %	2.24	10 об. % (20.6 масс. %)	2.49	41	0.8	136	~30.6*	~25.3	1.0	0.5	—	180	0.2
PNMA/Fe ₃ O ₄ [83]	Силиконовое масло 100 сСт	Сферические частицы диаметром 350 нм с шероховатой поверхностью из наночастиц Fe ₃ O ₄ (содержание 32 масс. %)	1.49	10 об. % (14.7 масс. %)	—	42.04	2.5	171	~128*	~25	2.0	1.0	—	3500	17
MnFe ₂ O ₄ /ПАНИ [84]	Силиконовое масло (KF-96) 100 сСт	Сферические частицы диаметром 450 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки ПАНИ 25 нм, соотношение MnFe ₂ O ₄ /ПАНИ составляет 60.51/39.49 масс. %	1.89	5 об. % (9.4 масс. %)	0.14	27.46	2	171	~140*	~12	1.5	1.0	—	7500	13

Таблица 2. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	$M_{ч}$, змуг/г	E_{max} , кВ/мм	H_{max} , кА/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Предел текучести при 100 кА/м или при H_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(H))$	R , %	$K_{эфф.}$, отн. ед. (Е)	$K_{эфф.}$, отн. ед. (Н)**
ZnFe ₂ O ₄ /ПАНИ [80]	Силиконовое масло (KF-96) 100 сСт	Сферические частицы диаметром 400 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки ПАНИ 30 нм, соотношение ZnFe ₂ O ₄ /ПАНИ составляет 51.83/48.17 масс. %	2.4	5 об. % (11.6 масс. %)	—	43.93	4	274	~95	~14.1	1.5	1.0	—	2700	12
ZnFe ₂ O ₄ /PNMA [81]	Силиконовое масло (KF-96) 100 сСт	Сферические частицы со структурой ядро-оболочка размером 300–500 нм с шероховатой поверхностью, толщина оболочки PNMA 20–40 нм, соотношение ZnFe ₂ O ₄ /PNMA составляет 60.5/39.5 масс. %	2.1	5 об. % (10.2 масс. %)	—	39.93	3.5	171	~48.3	~26.6	1.5	1.5	—	1600	26
ПАНИ/ ZnFe ₂ O ₄ [91]	Силиконовое масло 100 сСт	Малиноподобные частицы со структурой ядро-оболочка размером ~2 мкм, оболочка наночастиц ZnFe ₂ O ₄ кубической формы размерами ~100 нм	5.4	5 об. % (22.8 масс. %)	—	73.7	1	171	~4.7*	~115	1.0	1.0	—	200	50

Таблица 2. Продолжение

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя		ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	$M_{ч}$, змУ/г	E_{max} , кВ/мм	I_{max} , кА/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Предел текучести при 100 кА/м или при I_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0)=f(\log(E))$	Наклон $\log(\tau_0)=f(\log(I))$	R , %	$K_{эфф.}$, отн. ед. (E)	$K_{эфф.}$, отн. ед. (H)**		
Оксид графена/ Gd ₂ O ₃ [85]	Силиконовое масло (полидиметилсилоксан) 100 сСт	Пластины оксида графена размером до нескольких мкм и толщиной 0.98 ± 0.13 нм, покрытые наночастицами 2.09 ± 0.25 нм	Соотношение Gd ₂ O ₃ /оксид графена по массе: 1:1 1:2 1:3	—	0.6 масс. %	2.93	0.40	4	343	50	1416	—	—	95	1100	520		
						6.85	0.26			140	1375						720	90
						18.4	0.14			180	1288						4900	210
Оксид графена/ Fe ₃ O ₄ [90]	Силиконовое масло 100 сСт	Пластины оксида графена размером до нескольких сотен нм, покрытые наночастицами 10 нм, соотношение оксид графена/Fe ₃ O ₄ по массе составляет: 5/1	—	15 масс. %	20 об. %	—	52.2	2.5	—	~91*	—	1.5	—	2400	—			
				20 об. %				—		222	—	~150	—	2.0 (<171 кА) 1.5 (>171 кА)	—	1		
Оксид графена/ Fe ₃ O ₄ / SiO ₂ [78]	Силиконовое масло (полиметилфенилсилоксан) 100 сСт	Пластины оксида графена толщиной 2 нм, покрытые наночастицами со структурой ядро-оболочка размером 28 нм. Содержание оксида графена 41.5 масс. %	2.45	25 об. % (45.7 масс. %)	70 об. % (85.5 масс. %)	—	16.1	3	796	12	6.71 [#]	—	—	82	90	0.5 [#]		
				—				—		—	114 [#]			—	1.5	—	0.09 [#]	
ПС/оксид графена/ Fe ₃ O ₄ [92]	Силиконовое масло (KF-96) 100 сСт	Сферические частицы ПС диаметром 300–500 нм с неоднородным покрытием из листов оксида графена размером до 300 нм, допированных наночастицами Fe ₃ O ₄ размером 10 нм	1.81	5 об. % (9.0 масс. %)	10 об. % (17.3 масс. %)	—	22.4	3	—	~15	—	1.5	—	550	—			
				—				—		—	~127	—	1.5	—	13			

Таблица 2. Окончание

Материал	Тип дисперсионной среды и ее вязкость	Морфология наполнителя	ρ , г/см ³	Концентрация	$\Delta\epsilon_{ж}$, отн. ед.	M_q , змУ/г	E_{max} , кВ/мм	H_{max} , кА/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max} , Па	Предел текучести при 100 кА/м или при H_{max} , Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(H))$	R , %	$K_{эфф.}$, отн. ед. (E)	$K_{эфф.}$, отн. ед. (H)**
SiO ₂ /TiO ₂ @ Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ [79]	Силиконовое масло 100 сСт	Сферические частицы диаметром 250 нм со структурой ядро-оболочка. Ядро состоит из частиц SiO ₂ /TiO ₂ со структурой ядро-оболочка размером 160 нм и толщиной оболочки 15 нм. Оболочка толщиной 30 нм состоит из слоя SiO ₂ с включениями наночастиц Fe ₃ O ₄	—	20 об. %	1.27	36.5	3	796	~9	~16 [#]	—	—	69	150	5 [#]

где ρ — плотность наполнителя, $\Delta\epsilon_{ж}$ — сила диэлектрической релаксации жидкости ($\Delta\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_\infty$; где ϵ_0 и ϵ_∞ диэлектрическая проницаемость в низко- и высокочастотном пределе, соответственно), M_q — намагниченность частиц наполнителя, E_{max} — наибольшая эксплуатационная напряженность электрического поля, не приводящая к пробоем, H_{max} — наибольшая эксплуатационная напряженность магнитного поля, R — равновесное седиментационное отношение высоты столба коллоидной фазы к высоте столба всей жидкости, $K_{эфф.}$ (E) — см. Таблицу 1.

* значения указаны при максимальной напряженности электрического поля.

** $K_{эфф.}$ (H) — относительная эффективность, рассчитанная как $K_{эфф.} = (\tau_H - \tau_0)/(\tau_0 H_{отн.} \omega)$, где τ_H (Па) — предел текучести под действием магнитного поля 100 кА/м или при H_{max} , τ_0 (Па) предел текучести вне магнитного поля, $H_{отн.}$ (отн. ед.) — нормированная напряженность магнитного поля (на 1 кА/м), ω (отн. ед.) — доля наполнителя. Значения рассчитаны для напряженности магнитного поля 100 кА/м, если не указано иное. Различия между массовым и объемным содержанием наполнителя не учитывали, во всех случаях где это возможно для расчетов использовали массовую концентрацию. Если τ_0 в исследовании не указано, для расчета использовали значение 0.1 Па.

[#] значения приведены при минимальной напряженности магнитного поля 159 кА/м.

Для определения некоторых числовых параметров по графическим экспериментальным данным использовали программное обеспечение GetData Graph Digitizer (Informer Technologies, Inc.).

вводят группу компенсационных зарядов в центры сфер и продолжают итерационное приближение, вводя новые группы компенсационных зарядов по мере необходимости. Эти последовательности имеют тенденцию сходиться к нулю, что указывает на то, что компенсационные расходы становятся незначительными по мере развития итерации. При установлении значений поляризации, зарядов изображения и компенсационных зарядов могут быть рассчитаны пространственный потенциал вокруг сфер и сила электростатического взаимодействия. В расчетах шаг итерации равен $N = 400$, что обеспечивает численную сходимость. Авторы получили достаточно ожидаемый результат — в случае двух одноименно заряженных сфер в однородном электрическом поле наблюдаются как ближнедействующее притяжение, так и дальнедействующее отталкивание. Небольшое уменьшение зазора между сферами приводит к значительному увеличению накопления разноименных зарядов на внутренних локализованных поверхностях сфер. Это приводит к существенному увеличению величины силы взаимодействия. Тем не менее отмечается лучшая сходимость метода множественных изображений с экспериментальными данными по сравнению с приближением эффективного диполя.

D. Das u D. Saintillan моделировали образование цепочек из сферических частиц в электроореологической жидкости и показали, что при увеличении электрического поля выше критического значения частицы начинают спонтанно вращаться в суспензии [97]. Хорошо известно, что частицы в суспензиях, ограниченные двумя измерениями, демонстрируют коллективное движение рядом со стенкой. В исследовании обнаружено, что в трех измерениях этот эффект не наблюдается. Вместо этого диэлектрофоретические силы также приводят к образованию цепочек под действием вращения Квинке, при этом соседние частицы вращаются в противоположных направлениях. Для моделирования использовали хорошо известные подходы к описанию пары частиц бесконечной области, которые были расширены до N частиц в периодической области. Моделирование проводили для размеров системы $N = 500$ и 1000 , при этом не было выявлено качественных различий между ними. Также показано, что пара вращающихся в противоположных направлениях сфер устойчива в направлении электрического поля, но неустойчива в перпендикулярном.

S. Mester u др. вывели новые аналитические уравнения для сил взаимодействия в линейной бидисперсной цепочке, где два типа сферических частиц разных размеров образуют периодическую структуру [98]. В работе использован микроскопический метод, в котором индуцированные дипольные моменты сфер в бидисперсной цепочке определяются как внешним электрическим полем, так и полем всех остальных индуцированных диполей. Дипольные

моменты сфер определяются на основе локальной напряженности поля в узлах частиц, что позволяет получить аналитическое уравнение для силы, индуцированной полем между частицами, которая зависит от соотношений размеров частиц. Результаты показали, что бидисперсная цепь становится прочнее с увеличением размера более крупного компонента, однако оказывается менее прочной по сравнению с соответствующей монодисперсной цепочкой. В исследовании рассчитано изменение диэлектрической проницаемости, вызванное наличием бидисперсных цепочек в случайной дисперсии диэлектрических сфер. Эффективная диэлектрическая проницаемость бидисперсной системы линейно пропорциональна концентрации цепей и занимает промежуточное значение между диэлектрической проницаемостью двух соответствующих монодисперсных систем. Авторы отмечают, что предложенный метод расчета может быть применен и к аналогичному случаю в магнитном поле, а также масштабирован для бидисперсных периодических кластеров с более высокими размерностями, таких как периодические монослои и кубические решетки.

J.I. Kach u др. исследовали коллективную динамику эмульсий, в которых капли подвергаются электрогидродинамическим и диэлектрофоретическим взаимодействиям [99]. Моделирование проводили как в двумерной, так и трехмерной постановке задачи. В симуляции использовали $N = 1000$ сферических капель при объемном содержании 0.05 и 0.005 при моделировании взаимодействий в двух и трех измерениях соответственно. В монодисперсных эмульсиях капли в двух измерениях кластеризуются или кристаллизуются в зависимости от относительной силы электрогидродинамических и диэлектрофоретических взаимодействий. В трех измерениях образование цепочек, вызванное диэлектрофоретическими силами, подавляется электрогидродинамическими вплоть до полного исчезновения. При введении второй популяции капель, электропроводность, диэлектрическая проницаемость или вязкость которых отличаются от первой популяции капель, взаимодействие между каплями становится невзаимным. В двумерном случае капли формируют активные димеры, тримеры и более крупные кластеры, которые продолжают перемещаться и вращаться, а в трех измерениях капли образуют цепи или объединяются в единый динамический слой.

J. Yuan u др. провели многомасштабное моделирование для объяснения результатов электроореологического поведения частиц ПАНИ различной морфологии [73]. Для моделирования использовали пакет программ LAMMPS. Модель частиц различной морфологии создавали набором сфер. Нановолокно представляет собой линейную комбинацию 5 сфер, а нанопластина — квадрат из 16 частиц. Параметры взаимодействия между частицами задавали таким

образом, чтобы заданную морфологию можно было рассматривать как твердое тело. Число частиц наполнителя при моделировании составляло 191 для всех случаев. Матрицу (силиконовое масло) моделировали с помощью N числа крупнозернистых частиц. Для построения трехмерных моделей частицы ПАНИ и матрицы равномерно распределяли в области моделирования с учетом объемной доли наполнителя в реальных материалах (10 об. %). Перекрывание частицы при моделировании было исключено. Далее систему оптимизировали в течение 5×10^6 шагов для равномерного распределения частиц и прикладывали скорость сдвига в одном направлении и электрическое поле заданной напряженности в перпендикулярном направлении. В результате выполнения 10^8 шагов были получены соответствующие значения вязкости для частиц различной морфологии. Моделирование показало, что под действием электрического поля частицы поляризуются и взаимно притягиваются, образуя цепочечные структуры в направлении электрического поля. Сферические частицы легко формируют отдельные цепочки, содержащие дефекты. Частицы нановолокон соединяются друг с другом торцами или частично перекрываются, образуя сложную цепочечную структуру. Пластинчатые частицы, в свою очередь, образуют сложную цепочечную структуру с различной латеральной ориентацией. При приложении сдвигового напряжения цепочечная структура из сферических и пластинчатых частиц наклоняется и распадается на короткие цепочки, в отличие от волокон, для которых структура наклоняется и образует сложную дендритную сетку, препятствуя разрушению. Авторы делают вывод, что по мере увеличения анизотропии частиц электрореологический эффект усиливается из-за повышения стабильности цепочечной структуры. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

М.А. Нагие и др. исследовали организацию коллоидных частиц в жидкой среде при комбинированном воздействии ортогонально направленных электрического и магнитного полей с соответствующим моделированием полученных результатов [100]. Водную дисперсию карбоксил-функционализированных магнитных микросфер размером 1.05 мкм помещали между двумя оптически прозрачными электродами оксида индия-олова (ИТО), зазор $h = 100$ мкм. Между пластинами ИТО формировали переменное электрическое поле, перпендикулярное подложке (вдоль оси z). Двумерные магнитные поля создавали с помощью четырех медных соленоидов с воздушным сердечником, расположенных ортогонально в плоскости $x-y$ (Рис. 6а). Переменное электрическое поле изменяли в диапазоне 0–10 В при частоте от 350 Гц до 1 МГц. Величина индукции магнитного поля составляла 4.25 или 5.1 мТл при частоте 50 Гц. Комбинация

одномерного переменного магнитного поля с одномерным переменным электрическим полем позволяет управлять организацией коллоидных частиц. При одновременном действии электрического и магнитного поля частицы выстраиваются в плотные, хорошо выровненные цепочки. Действие полей генерирует два ортогонально направленных диполя, что позволяет регулировать притяжение и отталкивание частиц. Как межцепочечные, так и внутрицепочечные расстояния можно регулировать, изменяя концентрацию частиц и относительную напряженность обоих полей. При высоких концентрациях частиц отдельные микросферы под действием электрического поля могут собираться в тримеры, тетрамеры, гептамеры и нонамеры (Рис. 6б–6д). В свою очередь, эти упорядоченные агрегаты служат строительными блоками для создания иерархических структур при наложении одномерного магнитного поля (Рис. 6е–6и). Наблюдаемые экспериментально структуры были смоделированы методом Монте-Карло. Взаимодействие между частицами задавали потенциалом Штокмайера, который включает в себя взаимодействие Леннарда-Джонса, электрическое и магнитное дипольное взаимодействия. В моделировании не учитывали взаимодействие частиц с подложкой и ограничивали положение частиц в моно- или бислое, фиксируя z -координату. Использование в моделировании 240, 500 или 1000 частиц дает близкие результаты. Количество шагов при расчете составляло 10^5 . На каждом шаге N случайно выбранных частиц последовательно перемещались в направлениях x и y . Результаты моделирования хорошо воспроизводят экспериментально наблюдаемые структуры (Рис. 6). Исследование демонстрирует преимущества одновременного использования электрического и магнитного поля для управления коллоидной сборкой. Результаты моделирования не только подтверждают экспериментальные результаты, но также позволяет прогнозировать особенности организации частиц в новые структуры.

A. Bhattacharya и S. Chakraborty описывают влияние электрореологических жидкостей в процессах селективного обогащения и обеднения заряженных частиц в микрофлюидных каналах переменной площади сечения [101]. Концентрационная поляризация — явление, которое возникает в ионном растворе при приложении электрического поля и приводит к локальному обогащению и обеднению ионами. В работе исследуется возникновение концентрационной поляризации в электрореологической жидкости, содержащей ионные частицы, при ее течении через канал переменного сечения на примере различных коаксиальных микроканалов. Внешнее электрическое поле накладывается вдоль оси канала, а формирование двойного электрического слоя на поверхности канала при течении создает дополнительное

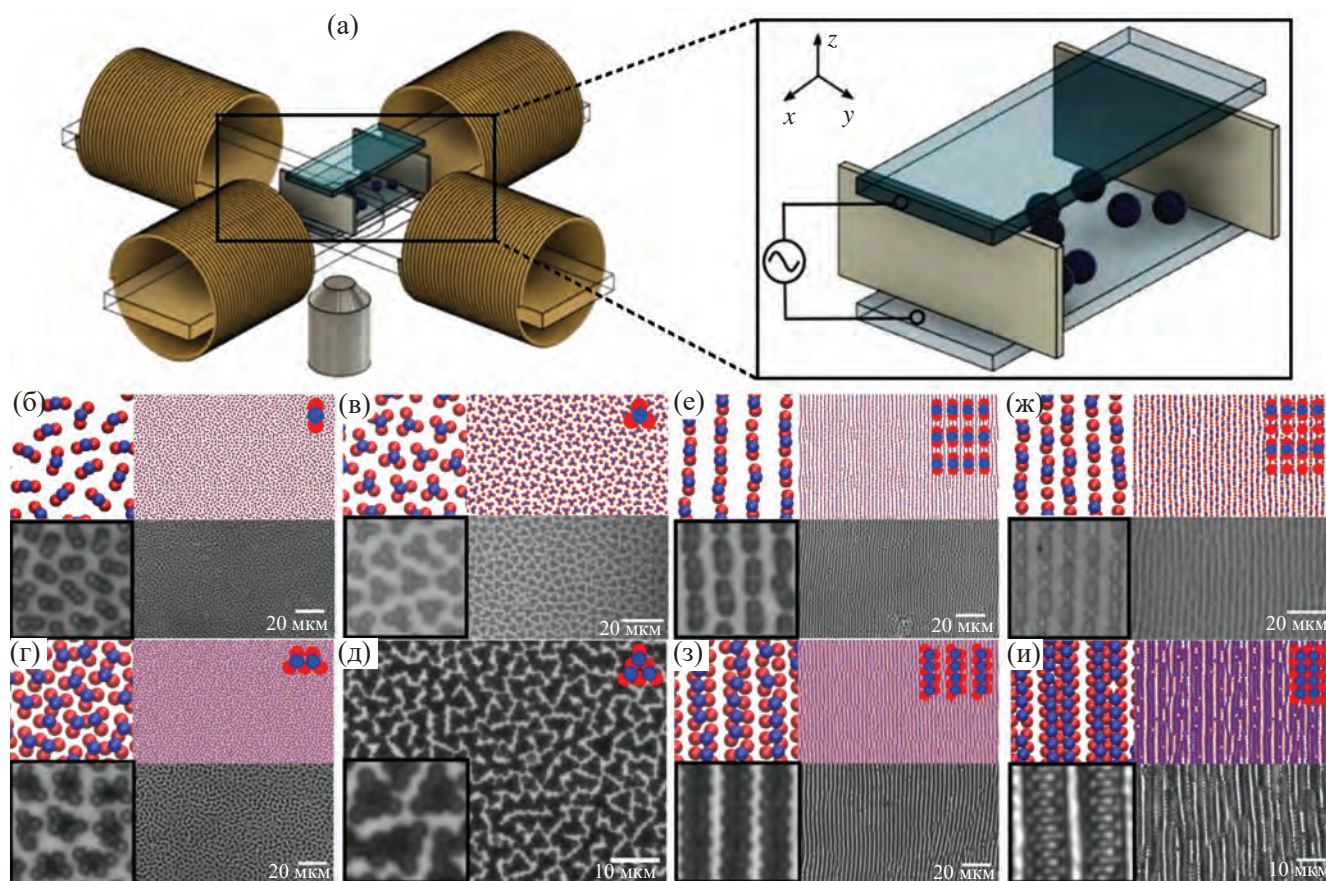


Рис. 6. Схематическое изображение экспериментальной установки (а): электрическое поле направлено вдоль оси z , магнитное поле направлено вдоль осей x и y ; напряженность электрического поля варьировали от 0 до 10 В, зазор 100 мкм, частота от 500 Гц до 1 МГц; напряженность приложенного магнитного поля варьировали в диапазоне от 0 до 6 мТл, частота 50 Гц. Результаты организации коллоидных частиц в цепочки (б–и) под действием внешнего стимула, экспериментальные данные и результаты моделирования (красные сферы представляют собой частицы в нижнем слое, синие – в верхнем). Различные типы структур, сформированные под действием электрического поля: тримеры (б), тетрамеры (в), гептамеры типа «бабочка» (г), треугольные нонамеры (д), и ориентированные цепочки, сформированные при наложении ортогонального магнитного поля, из тримеров (е), тетрамеров (ж), гептамеров (структуры типа «застежка-молния») (з) и треугольных нонамеров (двухколоночные пучки) (и). Параметры эксперимента и моделирования указаны в оригинальной рукописи. Адаптировано из работы [100]. Copyright © 2025, American Chemical Society.

Fig. 6. Schematic representation of the experimental setup (a): the electric field is directed along the z axis, the magnetic field is directed along the x and y axes; the electric field strength ranged from 0 to 10 V, a gap of 100 microns, frequency from 500 Hz to 1 MHz; the applied magnetic field strength ranged from 0 to 6 mT, 50 Hz frequency. The results of the organization of colloidal particles into chains (b–i) under the influence of an external stimulus, experimental data and simulation results (red spheres represent particles in the lower layer, blue – in the upper). Various types of structures formed under the action of an electric field: trimers (b), tetramers (c), butterfly-type heptamers (d), triangular nonamers (e), and oriented chains formed by applying an orthogonal magnetic field from trimers (f), tetramers (g), heptamers (structures of the "zipper" type) (h) and triangular nonamers (two-column bundles) (i). The experimental and modeling parameters are specified in the original manuscript. Adapted from [100]. Copyright © 2025, American Chemical Society.

электрическое поле, ортогональное оси канала. Поперечный диаметр канала считается малым по сравнению с длиной, поэтому предполагается однонаправленный поток жидкости и перенос ионов. Поскольку электрическое поле направлено вдоль потока, формирование колончатых структур из частиц дисперсной фазы не ограничивает течение. Возникновение

второй ортогональной компоненты электрического поля учитывается в параметре, отражающем условную долю предела текучести, препятствующего течению. Численное моделирование выполняли методом конечных элементов в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Моделирование показало, что область сужения действует как зона обеднения

ионов, а область расширения как зона обогащения. В случае электрореологических жидкостей по сравнению с ньютоновскими эти области более выражены. Этот эффект связан с постоянством скорости течения электрореологической жидкости по всему поперечному сечению канала, в отличие от ньютоновской жидкости, для которой характерно изменение скорости при изменении сечения. В работе выявлено изменение профиля концентрации ионов по сечению канала в зависимости от соотношения диаметров зон сужения и расширения, концентрации ионов в жидкости, напряженности электрического поля и вязкости. Авторы отмечают, что результаты исследования могут быть использованы для точного контроля локальных профилей концентрации, что имеет перспективы в области разделения веществ и сенсорных технологий.

I. Chaudhary и M. Kaushal исследовали влияние напряженности электрического поля и скорость растяжения на поведение электрореологических жидкостей [102]. Образец жидкости помещали между параллельными пластинами реометра, к пластинам прикладывали электрическое поле и верхнюю пластину тянули с постоянной скоростью, вызывая растяжение материала. Напряженность электрического поля поддерживали постоянной, изменяя напряжение в соответствии с увеличением зазора между пластинами. В качестве электрореологической жидкости использовали 40 масс. % дисперсию кукурузного крахмала в силиконовом масле. В исследовании выявлено две области течения материала при вытяжке. Сначала нормальная сила увеличивается с увеличением зазора, достигая максимального значения, а затем уменьшается. Первая область более выражена при высокой напряженности электрического поля, поскольку в ней доминирует упругая деформация. Вторая область смещается в сторону больших величин зазора при увеличении напряженности поля. Отмечается совпадение кривых течения во второй области при их нормировке на величину зазора и напряженность электрического поля. Поскольку удлинение в объеме требует наличия слоя скольжения на границе раздела поверхности пластины и объема материала, для описания наблюдаемых явлений использовали модель скользящего слоя, толщина которого является параметром. Показано, что толщина слоя скольжения уменьшается с увеличением напряженности электрического поля при заданной скорости вытягивания и не зависит от скорости в области медленного течения. Авторы отмечают сходство поведения материалов в электрическом поле с мягкими материалами в застеклованном состоянии при сжатии.

P.R. Saffari и др. анализировали свободные колебания композитной «сэндвич»-нанопластины, армированной функционально-градиентными углеродными

нанотрубками со слоем электрореологической жидкости в качестве ядра, под действием продольного магнитного поля с использованием нелокальной теории упругости [103]. Поли{(м-фениленвинилен)-co-[(2,5-диоктокси-п-фенилен)винилен]} рассматривали в качестве полимерной матрицы. В качестве электрореологического ядра рассматривали абстрактный материал с заданными характеристиками. Разработанная математическая модель включает в себя нелокальную теорию упругости и теорию сдвиговых деформаций третьего порядка для различных граничных условий. Для описания поведения свободных колебаний конструкции в ответ на воздействие различных факторов проводили параметрический анализ. Результаты работы показывают рост собственной частоты материала при приложении как электрического, так и магнитного поля, а также зависимость частоты и фактора потерь от геометрической толщины и расположения углеродных нанотрубок в оболочке. Вклад указанных факторов также зависит от напряженности электрического поля. *K. Khorshidi и др.* моделировали изменение собственной частоты аналогичной системы при взаимодействии с жидкостью, которое приводит к снижению значений [104]. Оценка собственной частоты колебаний электрореологических материалов имеет важное прикладное значение в области демпфирования.

H. Salunkhe и S. Thikane использовали методы линейной алгебры для описания поведения электрореологических жидкостей [105]. Получены теоретические соотношения внутренней удельной энергии, потенциала, предела текучести, заряда частиц, тензора напряжений, магнитной и электрической поляризации и теплового потока. Однако в исследовании не приводится соответствия полученных соотношений экспериментальным данным.

P.S. Chung и др. развивают теоретические представления для создания универсального уравнения, описывающего зависимость предела текучести жидкостей от напряженности электрического поля [106]. В исследовании предложено эмпирическое уравнение, включающее критическую величину электрического поля, при которой зависимость динамического предела текучести от напряженности электрического поля в двойных логарифмических координатах изменяет наклон. В случае статического предела текучести такую зависимость связывают с механизмом эффекта, где квадратичная пропорциональность характерна для поляризационного механизма, коэффициент 1.5 отвечает механизму с доминированием проводимости, а 1 соответствует насыщению поляризации [107]. Изменение наклона свидетельствует о переходе от одного механизма к другому. Во многих исследованиях такой анализ применяют к зависимости динамического предела текучести, хотя перенос статических представлений на динамический режим остается

спорным. Универсальность предложенного в работе подхода заключается в использовании концепции мезоскопической элементарной области, в которой выделяют псевдочастицы, названные «глюонами». Объем электрореологической жидкости разбивается на конечное число элементарных областей с прямоугольной неравномерной сеткой, а усредненные эффекты взаимодействия частиц описываются глюонами. Глюоны «прилипают» к соседним элементарным областям, что приводит к образованию фибриллярных структур и увеличению предела текучести. Число глюонов увеличивается с ростом напряженности электрического поля. Считается, что предел текучести жидкости зависит от числа глюонов. Тем не менее результаты исследования остаются абстрактными, не имеют строго физического обоснования и не могут быть расширены на все известные электрореологические жидкости, поскольку для многих из них в исследуемом диапазоне отсутствует критическая величина электрического поля.

В заключение раздела отметим, что исследования, посвященные вопросам формирования цепочечных структур в электрореологических жидкостях, в основном рассмотрены в сферическом приближении, хотя современные жидкости часто содержат частицы сложной морфологии с высоким характеристическим отношением и шероховатой поверхностью.

ОБЛАСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Традиционные области применения электрореологических жидкостей и электрореологического эффекта достаточно широки и включают амортизаторы, тормоза, клапаны и муфты сцепления, тактильные устройства, акустические призмы, процессы транспортировки сырой нефти и электрополировки, а также активные смазочные материалы. Развитие современных технологий в XXI веке открывают новые перспективы применения стимул-чувствительных жидкостей, такие как оптические сенсоры, тактильные датчики, актуаторы и мягкие роботы, микрофлюидные технологии и др. [36, 108]. В настоящее время продолжают исследования применения электрореологических жидкостей как в традиционных, так и в относительно новых областях. Далее более детально рассмотрим некоторые из них.

Электрореологический эффект может быть использован для повышения текучести парафинистой сырой нефти. Обычно эффект снижения вязкости достигается путем расположения в потоке сетчатых электродов, между которыми при приложении потенциала формируются колончатые структуры из электрочувствительных примесей, что облегчает течение нефти. Другой возможный механизм связан с аккумуляцией заряженных частиц смол

и асфальтенов на поверхности частиц воска, уменьшая силы Ван-дер-Ваальса между частицами и снижая вязкость нефти. Типично такой эффект достигается под действием постоянного поля.

C. Zhang и др. исследовали влияние переменного электрического поля с импульсами различной формы волн (прямоугольная, синусоида, треугольная) на вязкость и предел текучести сырой нефти [109]. Измерения проводили при температуре на 1°C выше температуры застывания нефти. Холодная текучесть парафинистых сырых нефтей может быть улучшена действием переменного электрического поля. Обнаружено, что высокая частота электрического поля приводит к меньшему снижению вязкости по сравнению с низкочастотным полем. Вязкость образца нефти была снижена на 15.4% при скорости сдвига 10 с^{-1} при приложении синусоидального переменного поля напряженностью 5 кВ/мм и частотой 1 Гц . При одинаковой напряженности поля снижение вязкости от большего к меньшему характерно для волн прямоугольной, синусоидальной и треугольной формы соответственно, что объясняется различными среднеквадратичными значениями напряженности переменного поля и, следовательно, отличиями в электростатических силах. В заключении авторы отмечают, что поля постоянного тока остаются более предпочтительными для практического применения при холодной транспортировке нефти.

Y.-W. Xie и др. провели исследование для получения более глубоких представлений о механизме электрореологического эффекта в парафинистой нефти [110]. Авторы не наблюдали снижения вязкости сырой нефти при приложении электрического поля, однако значения модулей накопления и потерь, а также предела текучести значительно уменьшаются (до 37.7% в случае предела текучести при напряженности поля 3 кВ/мм). Для выявления механизма эффекта была проведена серия электрореологических тестов модельных парафинистых масел, состоящих из минерального масла (80%), о-ксилола (10%) и коммерческих восков (10%). В качестве присадок рассматривали электронейтральные коллоидные частицы Fe_3O_4 , заряженные коллоидные частицы (смолы) и маслорастворимый электролит $\text{C}_{22}\text{H}_{14}\text{CoO}_4$. Отмечается снижение предела текучести образца с Fe_3O_4 на 28% после действия электрического поля напряженностью 5 кВ/мм в течение 60 с. Добавление смол приводит к еще более значительному снижению значения предела текучести до 99%. Добавление маслорастворимого электролита не оказывает заметного влияния на значения предела текучести модельного образца нефти. Во всех случаях данные приведены ниже температуры застывания (24°C). Предполагается следующий механизм наблюдаемых эффектов. При приложении электрического поля заряженные частицы в масле могут перемещаться и сталкиваться с частицами парафина, а затем прилипать к их

поверхности. Столкновение частиц приводит к разрушению нативной сетки частиц парафина, а электростатическое отталкивание, возникающее при адгезии заряженной частицы к частице парафина, уменьшает притяжение между ними.

H. Wang и *Y. Lu* также исследовали реологическое поведение модельного образца нефти, состоящего из минерального масла и парафинового воска (5 масс. %), и не содержащего заряженных частиц смол и асфальтенов [111]. Поэтому механизм снижения вязкости материала в электрическом поле отличается. Кристаллы воска мигрируют к электродам в электрическом поле под действием электростатических сил притяжения между ними и электродом. При этом образуется прослойка масла, обедненная воском, и кажущаяся вязкость системы снижается. Отмечается, что в зависимости от знака электрического поля одинаковая напряженность приводит к различному снижению вязкости, причем этот эффект особенно выражен при более низких напряженностях поля и температурах. Так, авторам удалось добиться снижения вязкости на 89% при напряженности поля -3 кВ/мм.

S.D. Fernández-Silva и др. разработали электроактивные смазочные материалы из экологически чистых компонентов — касторового масла и двух типов глин в качестве наполнителя: органомодифицированного MMT (Cloisite 15A) и сепиолита (Pangel B20) [112]. Электрореологический отклик дисперсий открывает возможность электроактивного управления трением в трибологических контактах. Испытания активного управления коэффициентом трения проводили с использованием электрифицированного шарикоподшипникового узла при величине нормальной силы 5 Н и скорости вращения 500 об/мин при напряженности электрического поля 0.1 и 0.2 кВ/мм. Испытания шарикоподшипников проводили в режиме гидродинамической смазки, который характеризуется полным разделением контактных поверхностей относительно толстой пленкой смазки, а износ практически отсутствует. В этом режиме коэффициент трения зависит от вязкости смазки и меняется как при введении наполнителя в касторовое масло, так и при приложении электрического поля. Электроактивное управление позволяет регулировать вязкость смазочного материала под различные условия нагрузки и адаптировать смазывающую способность одного и того же материала к изменяющимся условиям работы. Введение 4 масс. % Cloisite 15A и Pangel B20 в касторовое масло позволяет изменять коэффициент трения до 10.7 и 25.4% при напряженности электрического поля 0.2 кВ/мм соответственно. Кроме того, под воздействием электрического поля поляризованные наночастицы концентрируются в точке контакта,

предотвращая утечку масла и улучшая смазочные свойства.

H. Sun и др. разработали новый наполнитель на основе P[MTMA][TFSI] с оболочкой из абразивных частиц α -Al₂O₃ высокой твердости для применения в полировке [113]. Электрореологическая жидкость выполняет роль рабочего тела, жесткость которого зависит от напряженности электрического поля. Эффективность электрополировки проверяли на заготовках из нержавеющей стали. Процесс позволяет получить поверхность со значительно меньшей шероховатостью (Рис. 7а). Так, для неполированной поверхности характерна зернистость с выраженными границами (Рис. 7а (В, Д)), в то время как для полированной области наблюдается объединение зерен и улучшение качества поверхности заготовки (Рис. 7а (Б, Г)). Конфокальные микроскопические изображения и соответствующий анализ поверхности показывают снижение значения шероховатости после полировки почти в 4 раза от 311 до 79 нм (Рис. 7а (Е–И)). В исследовании отмечена зависимость эффективности полировки от напряженности электрического поля, скорости вращения заготовки и расстояния между электродами и поверхностью заготовки. Рост напряженности электрического поля и увеличение скорости обработки ожидаемо ведут к повышению качества полировки. Увеличение зазора между образцом и рабочей головкой ведет к снижению качества поверхности, что определяется плотностью контакта между полировальным наконечником и заготовкой. Однако существует ограничение минимального зазора, связанное с электрическим пробоем. Также сообщается, что простая смесь наполнителей (P[MTMA][TFSI] и α -Al₂O₃) в жидкости не позволяет эффективно полировать поверхность, предположительно из-за низких значений предела текучести, т.е. недостаточной прочности (твердости) колончатых структур.

Z. Kesy и др. оптимизировали конструкцию гидродинамического тормоза с электрореологической жидкостью на основе математической модели, минимизирующей 6 функций [114]. В гидродинамическом тормозе установлен ротор с радиальными лопатками, расположенными в плоскостях, проходящих через ось ротора. Тормоз работает следующим образом. Ротор насоса направляет жидкость в ротор турбины и давит на лопатки, что приводит к появлению реактивного момента. После подачи высокого напряжения на лопатки ротора создается электрическое поле и касательные напряжения в электрореологической жидкости возрастают. В свою очередь, это приводит к увеличению сопротивления потоку жидкости и уменьшению крутящего момента. Для оптимизации модели предварительно экспериментально были определены 7 коэффициентов,

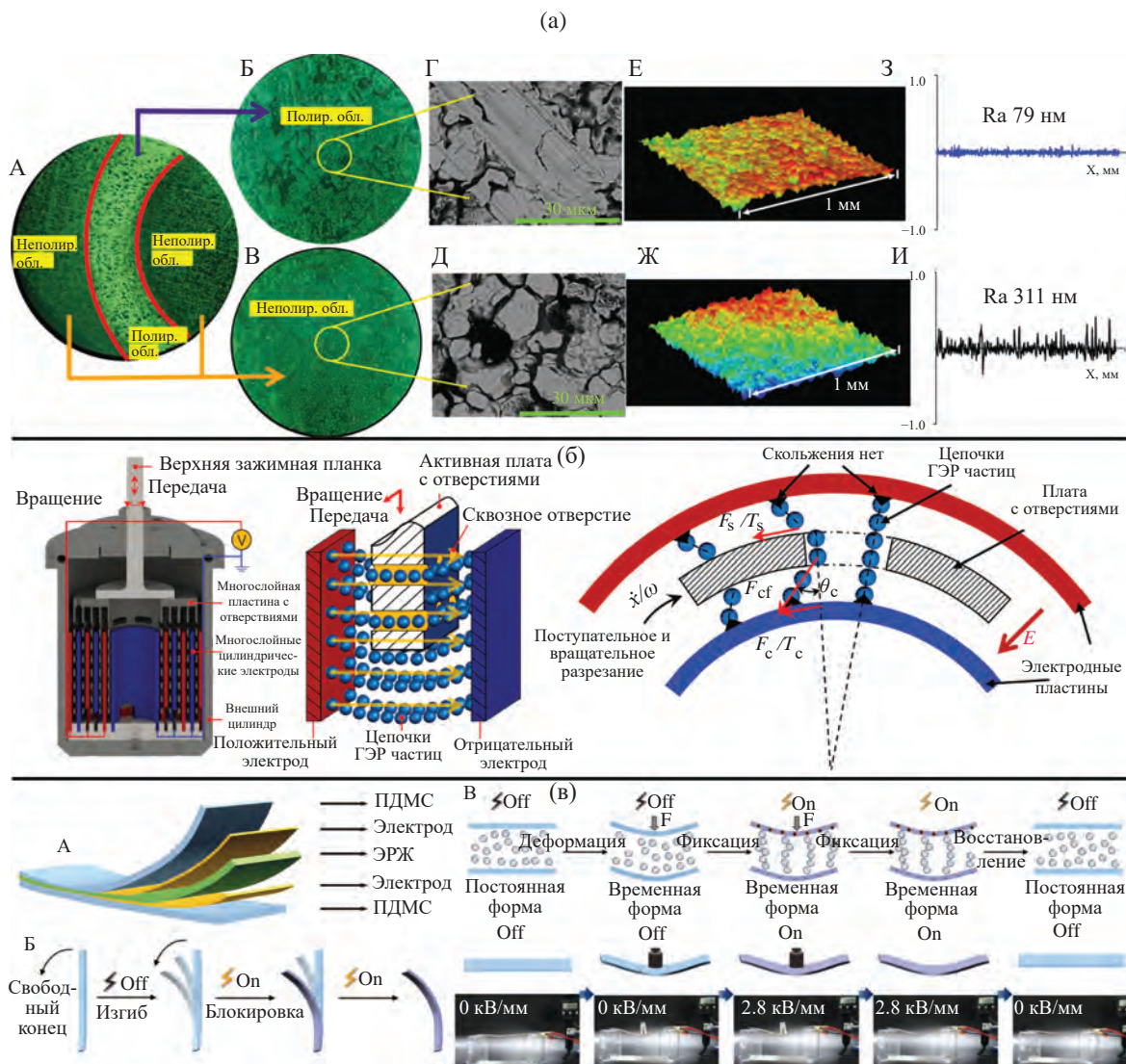


Рис. 7. Результаты электроореологического полирования нержавеющей стали в течение 4 ч при скорости вращения заготовки 400 об/мин напряженности электрического поля 3 кВ/мм и расстоянием между электродами и заготовкой 2 мм (а): металлографические микроскопические изображения (А–В), изображения растровой электронной микроскопии поверхности (Г, Д), конфокальные микроскопические изображения (Е, Ж) и значения шероховатости поверхности Ra (З, И) полированных и неполированных деталей из нержавеющей стали. Схематическое изображение демпфера с гигантской электроореологической жидкостью в качестве рабочего тела (б): устройство демпфера в разрезе, а также механизм функционирования в режиме «разрезания», где θ_c – максимальный угол наклона между цепочкой частиц и направлением электрического поля, F_s и F_c – сила сдвига и разрезания соответственно, T_s и T_c – крутящий момент сдвига и разрезания соответственно, F_{cf} – сила взаимодействия между частицами, определяющая прочность колончатой структуры. Актуатор на основе электроореологической жидкости (в): схематическое изображение мягкой конструкции с регулируемой жесткостью (А), иллюстрация принципа функционирования актуатора путем фиксации его положения электрическим полем (Б) и демонстрация функции памяти формы (В). Адаптировано из работ [113] (а), [115] (б) и [119] (в). Copyright © 2023, American Chemical Society, Copyright © 2024, Elsevier и Copyright © 2023, The Royal Society of Chemistry соответственно.

Fig. 7. Results of electrorheological polishing of stainless steel for 4 hours at a workpiece rotation speed of 400 rpm with an electric field strength of 3 kV/mm and a distance between the electrodes and the workpiece of 2 mm (a): metallographic microscopic images (A–B), scanning electron microscopy images of the surface (D, E), confocal microscopic images (F, G) and surface roughness values Ra (H, I) of polished and unpolished stainless steel parts. Schematic representation of a damper with a giant electrorheological fluid as a working medium (b): the device of the damper in section, as well as the mechanism of operation in the "cutting" mode, where θ_c is the maximum angle of inclination between the chain of particles and the direction of the electric field, F_s and F_c are shear and cutting forces, respectively, T_s and T_c are the shear and cutting torque, respectively, F_{cf} is the force of interaction between particles, which determines the strength of the columnar structure. Actuator based on an electrorheological fluid (c): schematic representation of a soft structure with adjustable rigidity (A), illustration of the principle of operation of the actuator by fixing its position with an electric field (B) and demonstration of the shape memory function (C). Adapted from [113] (a), [115] (b) and [119] (c). Copyright © 2023, American Chemical Society, copyright © 2024, Elsevier and copyright © 2023, The Royal Society of Chemistry respectively.

включающие коэффициент, характеризующий плотность материала корпуса по отношению к объему ротора, коэффициент потерь на трение, коэффициент в уравнении, учитывающем снижение давления, вызванное увеличением касательных напряжений, коэффициенты пропорциональности предела текучести и тока утечки электроореологической жидкости квадрату напряженности электрического поля, временная константа отклика в электрическом поле и диэлектрическая проницаемость жидкости. В качестве электроореологической жидкости использовали коммерческий продукт LID3354S, представляющий собой до 38 об. % полимерных частиц размером менее 45 мкм в силиконовом масле. Для оптимизации использовали метод Монте-Карло. Функции оптимизации включали тормозной момент, тормозной вес, электрическую мощность, поглощаемую тормозом, и время нарастания момента. Расчеты проводили для выбранных диапазонов по количеству лопастей, расстоянию между ними, радиусам (внутренний и внешний) рабочего пространства тормоза и используемой напряженности электрического поля. Авторы отмечают важность выбора граничных условий для проведения оптимизации. Исследование показывает принципиальную возможность и предлагает обобщенный подход проведения оптимизации сложных устройств на основе стимул-чувствительных жидкостей в качестве рабочего тела.

Для «умных» демпферов на основе электро-/магнитореологических жидкостей характерно устройство работы в режиме сдвига, течения или сжатия. *X. Сао и др.* предложили конструкцию демпфера, которая объединяет два принципа (сдвига и течения) и функционирует в режиме «разрезания» [115]. Особенностью устройства такого демпфера является наличие активной платы с отверстиями между зафиксированными электродами, что обуславливает одновременную реализацию режима сдвига (движение активной платы относительно неподвижного электрода) и течения (выталкивание жидкости активной платой). Прототип демпфера состоит из многослойной цилиндрической структуры из набора электродов и активных плат и обладает демпфирующей способностью с двумя степенями свободы (поступательное и вращательное движение) (Рис. 76). Во время работы в режиме «разрезания» ориентированная электрическим полем колонна частиц растягивается до разрыва при высокой деформации, превышающей силы взаимодействия между частицами (F_c), с дальнейшей рекомбинацией частиц и восстановлением структуры в области отверстий активной платы. При этом в зависимости от режима демпфирования, т.е. вращательного или поступательного, на колонну частиц действуют компоненты силы сдвига (F_s) и разрезания (F_c) или крутящего момента сдвига (T_s) и разрезания (T_c).

Отмечается, что форма отверстий активной платы влияет на силу демпфирования. Используя в качестве рабочего тела гигантскую электроореологическую жидкость частиц оксалата титанила бария, покрытого мочевиной, в силиконовом масле, было показано, что при одинаковых площадях отверстий активной платы и рабочих условиях горизонтальное суженное отверстие обеспечивает наибольшую демпфирующую силу до 300 Н. При этом диапазон регулирования составляет 15 и 6.5 раз для максимальной демпфирующей силы и крутящего момента соответственно при напряженности электрического поля до 3 кВ/мм. Предложенная конструкция демпфера была использована в экспериментальном стенде для подавления вибрации в роторных системах с трансмиссионными валами [116]. Показано снижение пикового среднеквадратичного значения виброускорения при резонансе вала трансмиссии на 63.1%, а также подавление вибраций до 88.9% при напряженности электрического поля 3 кВ/мм.

Мягкая робототехника — современная область науки, связанная с разработкой и созданием автоматизированных технических систем из мягких материалов, обеспечивающих гибкость и адаптируемость при выполнении своих функций. Мягкие роботы имеют перспективы применения при исследовании космоса и океана, биомимикрии, в медицине при малоинвазивной хирургии и постоперационной реабилитации и др. [117]. Электроореологические жидкости также находят применение при разработке элементов мягких робототехнических устройств.

Так, *Y. Pan и др.* разработали элемент переменной жесткости из мягких материалов на основе электроореологической жидкости [118]. Устройство представляет собой капсулу для электроореологической жидкости в конфигурации типа «сэндвич». В качестве материала капсулы использовали низкомодульный полиуретановый каучук, на который наносили тонкие слои углеродных нанотрубок, выполняющие роль электродов. В качестве рабочего тела использовали коммерческую электроореологическую жидкость компании Ningbo Maiwei Technology Co., Ltd. Диаметр закрытой оболочки составляет 30 мм, а общий вес 4 г. Устройство сохраняет эластичность и мягкость благодаря выбранным материалам и переходит в жесткое состояние при подаче потенциала за счет электроореологического эффекта. Жесткость можно непрерывно, независимо и обратимо регулировать путем приложения электрического поля различной напряженности. Элемент обладает хорошей адгезией к поверхностям, в том числе сложной топологии, ввиду высокой податливости в мягком состоянии и направленного изменения жесткости при стимулировании. Такой мягкий робот способен удерживать вес до 80 г при напряженности поля

1.75 кВ/мм, что почти в 19 раз больше его собственного веса. Устройство демонстрирует достаточно хорошую стабильность отклика и долгосрочность нахождения в активном (жестком) состоянии. Например, такой мягкий робот был прикреплен к карандашу и подвешен с грузом 50 г в жестком состоянии в течение 25 минут. Также была продемонстрирована возможность присоединения и отсоединения устройства как минимум на протяжении 9 циклов в течение 64.4 ч. Авторы отмечают возможность совмещения элемента с другими системами, простоту масштабирования производства и возможности регулирования его размеров и форм в широком диапазоне. Тем не менее срок службы таких устройств может быть ограничен из-за седиментации электрореологической жидкости и медленного набухания инкапсулирующих материалов дисперсионной средой.

Схожий подход для получения мягкого актуатора использовали *H. Jing и др.* [119]. Принципиальное отличие конструкции заключается в размещении электродов в непосредственном контакте с электрореологической жидкостью, а не на поверхности эластомерной капсулы (Рис. 7в (А)). Мягкую оболочку формовали из двухкомпонентного силикона (PDMS184), в качестве электродов использовали медную фольгу. Электрореологическая жидкость — дисперсия частиц оксалата титанила кальция в силиконовом масле (1.5 г/1 мл). Надежное крепление электродов к эластомерной оболочке осуществляли с помощью этилцианоакрилатного клея. Между электродами помещали резиновые прокладки толщиной 1 мм во избежание прямого контакта. В исследовании также продемонстрировано направленное изменение жесткости актуатора, способность проявлять эффект памяти формы и фиксировать движение изделия. Так, при вертикальном расположении актуатора и размещении груза на свободном конце наблюдается его изгибная деформация под действием силы тяжести. При приложении электрического поля актуатор фиксируется в выбранном положении за счет перехода электрореологической жидкости в твердое состояние (Рис. 7в (Б)). В эксперименте угол изгиба достигал 69°. Отмечается быстрое время отклика актуатора порядка 65 мс на электрический стимул. Эффект памяти формы был продемонстрирован путем нагружения актуатора (масса груза 100 г) в горизонтальном положении (Рис. 7в (В)). Без электрического поля под действием груза актуатор деформируется и изгибается, принимая временную форму, которая может быть зафиксирована путем приложения электрического поля. После удаления груза (снятия нагрузки) форма актуатора сохраняется и восстанавливается в исходное состояние только после выключения электрического поля. Авторы отмечают перспективы применения таких мягких структур с изменяемой жесткостью и быстрым откликом в мягких роботах и искусственных мышцах.

M. Bhattacharyya и др. разработали стимул-чувствительные печатные чернила для гибкой электроники на основе силилированного углеродного нановолокна и силиконового масла [120]. Исследования электрореологических свойств композиций при содержании наполнителя до 8 масс. % позволили определить оптимальную концентрацию нановолокон 4 масс. % (выше порога перколяции — 2.4 масс. %). При этой концентрации не наблюдается быстрого разделения фаз, а образец проявляет наибольшую устойчивость к пробое под действием электрического поля до 0.6 кВ/мм. Реологические свойства композиции позволяют использовать материал в качестве чернил при печати, а чувствительность к электрическому полю открывает возможность создания датчика давления. Прототип сенсора аналогично рассмотренным выше исследованиям выполнен по типу «сэндвича» из полипропиленовой клейкой ленты, медной ленты и разработанных чернил. Размер устройства составляет порядка 3 × 2 см, содержание электрореологической жидкости — 1 г. Сенсор обладает электрической емкостью, значение которой стабилизируется в течение 300 мин, что объясняется формированием равновесной структуры чернил. При приложении силы происходит увеличение емкости за счет уменьшения расстояния между электродами и увеличения площади контакта чернил с электродом. Сенсор на основе разработанных чернил демонстрирует способность определять давление с чувствительностью 6.3%/кПа с увеличением емкости на 140% при давлении 20 кПа и сохраняет стабильность на протяжении 60 циклов. Время отклика и восстановления составило 266 и 372 мс соответственно. Сенсор обладает рекордной чувствительностью среди датчиков в области умеренных давлений.

F. Sadi и др. предложили оригинальную концепцию эндоскопа с переменной жесткостью из гидравлических приводов на основе электрореологической жидкости [121]. Идея связана с конструкцией робота-змеи. Привод представляет собой комбинацию из двух или более сильфонов. Изменение давления в отдельных сильфонах приводит к многонаправленному изгибу и удлинению всего робота. Узел привода представляет собой «сэндвич»-структуру, состоящую из отдельных модулей, напечатанных на 3D-принтере. Для каждого модуля привода требуется четыре клапана, обеспечивающих обмен жидкостью в двух сильфонах. Верхняя круглая плата разделена на четыре сегмента в местах расположения клапанов. Нижняя плата выполняет функцию электрода заземления. Два противоположных сегмента клапана на верхней печатной плате подключены к источнику напряжения. При приложении электрического потенциала происходит переход жидкости в твердое состояние в зоне контактов и ограничивается обмен между сильфонами. Электрореологическая жидкость подается под давлением в первый сильфон.

При этом открытый сегмент клапана второго сильфонного соединения позволяет жидкости стекать в слив, что приводит к наклону привода. Чтобы вернуть привод в исходное положение или наклонить его в противоположном направлении, необходимо переключить электрическое поле на противоположные электродные сегменты верхней платы. Для создания гидравлического привода методом стерилизации использовали фотополимерный материал Elastic 50A. В качестве электроореологической жидкости применяли дисперсию частиц диоксида титана в силиконовом масле. Диаметр прототипа составляет 20 мм, что в 2 раза больше используемых в настоящее время эндоскопов. Функционирование гидравлического привода тестировали при наклоне привода на $\pm 10^\circ$ от начального состояния при давлении 2.4 бар и напряженности электрического поля 3 кВ/мм. Время нахождения привода в заданном состоянии составляло 35 с. К недостаткам прототипа относится короткий срок жизни сильфонов — из-за несовершенства выбранной технологии формования и частого расширения и сжатия через 10–15 циклов происходит разрыв. Несмотря на то, что устройство далеко от реального практического внедрения, исследование показывает перспективы создания гидравлически герметичных систем приводов на основе умных материалов для медицинской робототехники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном обзоре суммированы достижения в области электроореологии за последние несколько лет. Традиционными остаются исследования, связанные с разработкой новых наполнителей, проявляющих повышенную электроореологическую активность. Анализ большого числа экспериментальных статей показал, что в качестве основных перспективных материалов рассматривают частицы со структурой ядро–оболочка, в том числе полые, MOF, PIL, а также высокоанизотропные и высокопористые наполнители из природных и синтетических материалов (полимеры и алюмосиликаты).

Широко используется подход к модификации наполнителей путем допирования или создания оболочки, что позволяет регулировать электрические свойства наполнителя и, как следствие, стабильность и величину электроореологического эффекта жидкости. Эффективность материалов определяется не только значением предела текучести в электрическом поле, но и контрастностью изменения реологического поведения при стимулировании. Одним из перспективных направлений развития стимул-чувствительных жидкостей становится создание сложных систем, одновременно управляемых электрическим и магнитным полем. Основные подходы к получению таких жидкостей связаны с формированием гибридных наполнителей, чувствительных к действию обоих полей. Число исследований в этой области до сих пор остается единичным, а реологический отклик жидкостей в большинстве работ оказывается не высоким. Однако перспективы развития этого научного направления очевидны и нет сомнения в росте научных публикаций на эту тему в ближайшие годы. Современные теоретические исследования в области электроореологии посвящены различным аспектам и включают как моделирование процессов структурирования коллоидных частиц в дисперсиях и описание реологического поведения, так и специальные задачи по определению собственной частоты колебаний электроореологических материалов и др. В области практического применения исследования сфокусированы на изучении механизмов снижения вязкости парафинистых нефтей под действием электрического поля. Также продолжаются работы по созданию интеллектуальных тормозных систем и демпферов. Активное развитие в последние годы получает применение электроореологических жидкостей в области мягкой робототехники при создании электрочувствительных актуаторов и сенсоров. В заключение необходимо также отметить доступность в литературе обзоров, содержащих дополнительную информацию, в том числе в области электроореологических эластомеров [95, 122, 123].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Winslow W.M. Induced fibrillation of suspensions // J. Appl. Phys. 1949. V. 20. № 12. P. 1137–1140. <https://doi.org/10.1063/1.1698285>
2. Дейнега Ю.Ф., Виноградов Г.В. Влияние сильных электрических полей на структуру неводных пластичных дисперсных систем // Докл. АН СССР. 1962. Т. 143. № 4. С. 898–901.
3. Дейнега Ю.Ф., Виноградов Г.В. О поведении в электрическом поле и устойчивости неводных пластичных дисперсных систем // Докл. АН СССР. 1963. Т. 151. № 4. С. 879–882.
4. Deinega Y.F. The electrorheology of dispersed systems // J. Eng. Phys. 1970. V. 18. № 6. P. 679–682. <https://doi.org/10.1007/BF00827839>

5. *Deinega Y.F.* Hydrocarbon disperse systems in electric fields // *Chem. Technol. Fuels Oils*. 1982. V. 18. № 12. P. 599–603.
<https://doi.org/10.1007/BF00725576>
6. *Deinega Y.F., Vinogradov G.V.* Electric fields in the rheology of disperse systems // *Rheol. Acta*. 1984. V. 23. № 6. P. 636–651.
<https://doi.org/10.1007/BF01438804>
7. *Korobko E.V., Matsepuro A.D.* Electrorheology: From its beginning to the present // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2010. V. 83. № 4. P. 707–714.
<https://doi.org/10.1007/s10891-010-0402-7>
8. *Shul'man Z.P., Korobko E.V.* Study of electrorheological effect during flow of dielectric suspensions in a horizontal coaxially cylindrical capacitor // *J. Eng. Phys.* 1974. V. 26. № 5. P. 568–571.
<https://doi.org/10.1007/BF00825995>
9. *Shulman Z.P., Gorodkin R.G., Korobko E.V., et al.* The electrorheological effect and its possible uses // *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 1981. V. 8. № 1–2. P. 29–41.
[https://doi.org/10.1016/0377-0257\(81\)80003-1](https://doi.org/10.1016/0377-0257(81)80003-1)
10. Шульман З.П., Носов В.М. Вращение непроводящих тел в электрореологических суспензиях / ред. О.Г. Мартыненко. Минск: Наука и техника, 1985. 59 с.
11. *Korobko E.V., Dreval V.E., Shulman Z.P., et al.* Peculiar features in the rheological behavior of electrorheological suspensions // *Rheol. Acta*. 1994. V. 33. № 2. P. 117–124.
<https://doi.org/10.1007/BF00366756>
12. *Shulman Z.P., Korobko E.V., Levin M.L., et al.* Energy dissipation in electrorheological damping devices // *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2006. V. 17. № 4. P. 315–320.
<https://doi.org/10.1177/1045389X06054580>
13. Шульман З.П., Дейнега Ю.Ф., Горюшкин Р.Г., и др. Электрореологический эффект / ред. А.В. Лыков. Минск: Наука и техника, 1972. 176 с.
14. *Gindin L.G., Vol'pyn A.E.* Structure formation in disperse systems in an electric field // *Russ. Chem. Rev.* 1968. V. 37. № 1. P. 53–60.
<https://doi.org/10.1070/rc1968v037n01abeh001607>
15. *Lazareva G.G., Korobko E.V., Ragotner M.M., et al.* The electrorheological activity of polymer filler-based dielectric suspensions // *Kolloid. Zh.* 1991. V. 53. № 2. P. 266–271.
16. *Moiseev A.A., Korobko E.V., Vedernikova L.G.* Structural viscosity of electrorheological fluids // *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 1992. V. 42. № 1–2. P. 213–230.
[https://doi.org/10.1016/0377-0257\(92\)80010-U](https://doi.org/10.1016/0377-0257(92)80010-U)
17. Коробко Е.В., Белоус Н.Х., Люблинер И.П., Маршак В.А. Электрореологические свойства суспензий углеродных волокон в полиметилсилоксановой жидкости // *Коллоид. журн.* 2000. Т. 62. № 2. С. 178–182.
18. *Korobko E.V., Gorodkin R.G., Mardosevich M.I., et al.* Peculiarities of showing capillary effects by electrorheological fluids // *Int. J. Mod. Phys. B*. 2005. V. 19. № 07n09. P. 1388–1394.
<https://doi.org/10.1142/S0217979205030347>
19. *Murashkevich A.N., Alisienok O.A., Zharskii I.M., et al.* Modified titania and titanium-containing composites as fillers exhibiting an electrorheological effect // *Inorg. Mater.* 2013. V. 49. № 2. P. 165–171.
<https://doi.org/10.1134/S0020168513020209>
20. *Korobko E.V., Novikova Z.A.* Features of the mechanisms of conductivity of the electrorheological fluids with double doped TiO₂ particles under external temperature effects // *Front. Mater.* 2019. V. 6. P. 1–9.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00132>
21. Нефедова Т.А., Агафонов А.В., Давыдова О.И., и др. Золь-гель синтез гибридного материала диоксид кремния/полипропиленгликоль и электрореологические характеристики его дисперсий в полидиметилсилоксане // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2006. Т. 12. № 3. С. 391–406.
22. Краев А.С., Агафонов А.В., Давыдова О.И., Нефедова Т.А., Трусова Т.А., Захаров А.Г. Золь-гель синтез диоксида титана и гибридного материала диоксид титана/гидроксипропилцеллюлоза и электрореологические характеристики дисперсий на их основе в полидиметилсилоксане // *Коллоид. журн.* 2007. Т. 69. № 5. P. 661–667.
<https://doi.org/10.1134/S1061933X07050122>
23. Агафонов А.В., Нефедова Т.А., Давыдова О.И. Электрореология суспензий мезоструктурированных и мезопористых кремнезёмов в полидиметилсилоксане // *Коллоид. жуон.* 2008. Т. 70. № 5. P. 581–586.
<https://doi.org/10.1134/S1061933X08050013>

24. Davydova O.I., Kraev A.S., Redozubov A.A., et al. Effect of polydimethylsiloxane viscosity on the electrorheological activity of dispersions based on it // Russ. J. Phys. Chem. A. 2016. V. 90. № 6. P. 1269–1273.
<https://doi.org/10.1134/S0036024416060054>
25. Agafonov A.V., Davydova O.I., Krayev A.S., et al. Unexpected effects of activator molecules' polarity on the electrorheological activity of titanium dioxide nanopowders // J. Phys. Chem. B. 2017. V. 121. № 27. P. 6732–6738.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04131>
26. Egorysheva A.V., Kraev A.S., Gajtko O.M., et al. High electrorheological effect in Bi_{1.8}Fe_{1.2}SbO₇ suspensions // Powder Technol. 2020. V. 360. P. 96–103.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.027>
27. Kuznetsov N.M., Stolyarova D.Y., Belousov S.I., et al. Halloysite nanotubes: Prospects in electrorheology // Express Polym. Lett. 2018. V. 12. № 11. P. 958–965.
<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2018.82>
28. Kuznetsov N.M., Bakirov A.V., Belousov S.I., et al. Orientation of layered aluminosilicates particles with a high aspect ratio in paraffin under an electric field // Dokl. Phys. 2019. V. 64. № 6. P. 249–252.
<https://doi.org/10.1134/S1028335819060077>
29. Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Zagoskin Y.D., et al. Specific features of the porous polymeric particle composites application as fillers for electrorheological fluids // Nanobiotechnology Rep. 2021. V. 16. № 6. P. 840–846.
<https://doi.org/10.1134/S2635167621060148>
30. Kovaleva V.V., Kuznetsov N.M., Istomina A.P., et al. Low-filled suspensions of α -chitin nanorods for electrorheological applications // Carbohydr. Polym. 2022. V. 277. P. 118792.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118792>
31. Solodukhin E.S., Kuznetsov N.M., Puchkov A.A., et al. The nature of the electrorheological and electrophoretic effects of detonation nanodiamonds suspensions in mineral oil // ChemChemTech. 2022. V. 65. № 10. P. 61–69.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226510.6613>
32. Kuznetsov N.M., Vdovichenko A.Y., Bakirov A.V., et al. The size effect of faceted detonation nanodiamond particles on electrorheological behavior of suspensions in mineral oil // Diam. Relat. Mater. 2022. V. 125. P. 108967.
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108967>
33. Hao T. Electrorheological fluids // Adv. Mater. 2001. V. 13. № 24. P. 1847–1857.
[https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200112\)13:24<1847::AID-ADMA1847>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200112)13:24<1847::AID-ADMA1847>3.0.CO;2-A)
34. Ko Y.G., Choi U.S. Negative electrorheological fluids // J. Rheol. 2013. V. 57. № 6. P. 1655–1667.
<https://doi.org/10.1122/1.4821857>
35. Agafonov A.V., Kraev A.S., Kusova T.V., et al. Surfactant-switched positive/negative electrorheological effect in tungsten oxide suspensions // Molecules. 2019. V. 24. № 18. P. 3348.
<https://doi.org/10.3390/molecules24183348>
36. Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Belousov S.I., et al. Electrorheological fluids: From historical retrospective to recent trends // Mater. Today Chem. 2022. V. 26. P. 101066.
<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101066>
37. Pavlikova E., Plachy T., Urbanek M., et al. Engineering conductivity and performance in electrorheological fluids using a nanosilica grafting approach // ACS Appl. Nano Mater. 2023. V. 6. № 11. P. 9768–9776.
<https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01475>
38. Chen S., Cheng Y., Zhao Z., et al. Core–shell-structured electrorheological fluid with a polarizability-tunable nanocarbon shell for enhanced stimuli-responsive activity // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2023. V. 15. № 29. P. 35741–35749.
<https://doi.org/10.1021/acsami.3c07133>
39. Chen S., Kuznetsov N.M., Hou L., et al. Limited electron-dominated electrorheological response with TiO₂ buffer layer // Nano Lett. 2025. V. 25. № 14. P. 5591–5598.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c05619>
40. Kang D., Kim C., Jekal S., et al. Synthesis of hollow-structured plate-type titania for electrorheological fluid application and recycling method of core into silica nanoparticle // J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc. 2025. V. 33. № 1. P. 5–16. (in Korean)
<https://doi.org/https://doi.org/10.17137/korrae.2025.33.1.5>

41. *Thapa K.B., Lee S.Y., Park S.J.* Diversified functional applications of flexible metal-organic frameworks // *Mater. Today Adv.* 2025. V. 26. P. 100588.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2025.100588>
42. *Wang L., Li C., Wang R., et al.* The preparation and smart electrorheological behavior of MOF-Ti@PANI core-shell nanoparticles // *J. Mol. Liq.* 2023. V. 376. P. 121373.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121373>
43. *Wang L., Chen L., Yan H., et al.* Synthesis and electrorheological behaviour of silica-coated porous metal-organic frameworks // *Ceram. Int.* 2024. V. 50. № 7. P. 11329–11340.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.01.033>
44. *Wang L., Yan H., Chen L., et al.* Preparation of a MIL-125/MoS₂/SiO₂ ternary nanohybrid and its smart electrorheological behavior // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2024. V. 16. № 43. P. 59302–59314.
<https://doi.org/10.1021/acsami.4c12828>
45. *Chong Z., Liyue W., Xiang J., et al.* Preparation and electrorheological behavior of rare-earth La ion doping MIL-125 nanoparticles // *Adv. Eng. Mater.* 2024. V. 26. № 23. P. 2401323.
<https://doi.org/10.1002/adem.202401323>
46. *Lebedeva O., Kultin D., Kustov L.* Polymeric ionic liquids: Here, there and everywhere // *Eur. Polym. J.* 2024. V. 203. P. 112657.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112657>
47. *Dong Y., Wang Y., Liu Y., et al.* Interfacial polarization and electrorheological effect of homo-poly(ionic liquid) and poly(ionic liquid)-hexyl methacrylate copolymer microsphere particles // *Polymer.* 2024. V. 299. P. 126970.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126970>
48. *Ben H., Du W., Zhao J., et al.* Ionic covalent organic frameworks: From synthetic strategies to advanced electro-, photo-, and thermo- energy functionalities // *Coord. Chem. Rev.* 2024. V. 517. P. 216003.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216003>
49. *Ma R., Nie W., Wang Y., et al.* Mixed ionic–electronic covalent organic frameworks as a platform for high-performance electro-responsive smart materials // *Chem. Mater.* 2024. V. 36. № 14. P. 6961–6972.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c01052>
50. *Calis-Ismetoglu G., Cevher S.C., Unal H.I.* Probing effect of counterions on electric field stimuli responsive behaviours of smart organoboron-based polyelectrolytes // *React. Funct. Polym.* 2024. V. 201. P. 105947.
<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105947>
51. *Cabuk M., Yavuz M., Unal H.I.* Effects of promoter and dedoping process on electrorheological response of polyaniline- graft -chitosan copolymer // *Mod. Phys. Lett. B.* 2025. V. 39. № 5. P. 1–14.
<https://doi.org/10.1142/S0217984924420077>
52. *Soares J.P., Letichevsky S., Soares B.G.* Electrorheological behavior of titania nanoparticles modified with iron (III) oxide // *J. Mol. Liq.* 2025. V. 429. P. 127632.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127632>
53. *Agresti F., Isopi J., Scattareggia Marchese S., et al.* Electrorheology of urea-functionalized lathlike goethite particles in silicone oil // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2025. V. 704. P. 135509.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135509>
54. *Piao S., Kwon S., Choi H.* Stimuli-responsive polymer-clay nanocomposites under electric fields // *Materials.* 2016. V. 9. № 1. P. 52.
<https://doi.org/10.3390/ma9010052>
55. *Ploehn H.J., Liu C.* Quantitative analysis of montmorillonite platelet size by atomic force microscopy // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006. V. 45. № 21. P. 7025–7034.
<https://doi.org/10.1021/ie051392r>
56. *Kuznetsov N.M., Shevchenko V.G., Stolyarova D.Y., et al.* Dielectric properties of modified montmorillonites suspensions in polydimethylsiloxane // *J. Appl. Polym. Sci.* 2018. V. 135. № 32. P. 46614.
<https://doi.org/10.1002/app.46614>
57. *Liu Y., Zhao X., Yin J.* Enhanced electro-responsive electrorheological efficiency of polyethylene oxide-intercalated montmorillonite nanocomposite suspension // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2023. V. 666. P. 131239.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131239>
58. *Erol O., Karatayeva U., Faul C.F.J.* Electrorheological fluids based on porous carboxyl-functionalized polytriphenylamines // *ACS Appl. Polym. Mater.* 2025. V. 7. № 3. P. 1205–1216.
<https://doi.org/10.1021/acsapm.4c02469>

59. Kelbysheva E.S., Danilin A.N., Ezernitskaya M.G., et al. Photoelectrorheological properties of polyimides with sulfo-acid and sodium salt sulfo-acid groups: a comparative study // *Eur. Phys. J. Plus.* 2023. V. 138. № 8. P. 747.
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04383-6>
60. Jekal S., Choi H., Otgonbayar Z., et al. Comparative study of the electrorheological properties of various halide perovskites // *ACS Omega.* 2025. V. 10. № 13. P. 13327–13338.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11212>
61. Kuznetsov N.M., Zagoskin Y.D., Vdovichenko A.Y., et al. Enhanced electrorheological activity of porous chitosan particles // *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 256. P. 117530.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117530>
62. Kuznetsov N.M., Zakharevich A.A., Vdovichenko A.Y., et al. Highly porous particles of cellulose derivatives for advanced applications // *ChemPlusChem.* 2024. V. 89. № 12. P. e202400375.
<https://doi.org/10.1002/cplu.202400375>
63. Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Volkov D.A., et al. Porous chitosan particles doped by in situ formed silver nanoparticles: Electrorheological response in silicon oil // *Polym. Adv. Technol.* 2022. V. 33. № 10. P. 3643–3657.
<https://doi.org/10.1002/pat.5817>
64. Kovaleva V.V., Kuznetsov N.M., Zagoskin Y.D., et al. Electrorheological behavior of cellulose in silicon oil. The effect of filler morphology // *Cellulose.* 2024. V. 31. № 7. P. 4099–4113.
<https://doi.org/10.1007/s10570-024-05862-4>
65. Кузнецов Н.М., Ковалева В.В., Вдовиченко А.Ю., Чвалун С.Н. Натуральные электроореологические жидкости на основе частиц целлюлозы в оливковом масле: размерный эффект наполнителя // *Коллоид. журн.* 2023. Т. 85. № 3. P. 339–349.
<https://doi.org/10.31857/S0023291223600153>
66. Fernández-Silva S.D., Delgado M.A., García-Pérez M., et al. Tunable structuring of nanocellulose-based sustainable lubricants by an external electric field // *J. Mater. Res. Technol.* 2025. V. 34. P. 2828–2835.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.183>
67. Wang Y., Zhao X., Li J., et al. Interfacial polarization and electrorheology of suspensions containing monodispersed ellipsoidal poly(ionic liquid) particles // *Macromolecules.* 2025. V. 58. № 11. P. 5560–5578.
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5c00175>
68. Dolinsky Y., Elperin T. Equilibrium orientation of an ellipsoidal particle inside a dielectric medium with a finite electric conductivity in the external electric field // *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 2005. V. 71. № 5. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.056611>
69. Stolyarova D.Y., Kuznetsov N.M., Belousov S.I., et al. Electrorheological behavior of low filled suspensions of highly anisometric montmorillonite particles // *J. Appl. Polym. Sci.* 2019. V. 136. № 25. P. 47678.
<https://doi.org/10.1002/app.47678>
70. Yuan J., Wang Y., Lei Q., et al. Influence of particle size on electrorheological effect of poly(ionic liquid) microsphere suspensions // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2023. V. 672. P. 131745.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131745>
71. Lu Q., Han W.J., Choi H.J. Smart and functional conducting polymers: Application to electrorheological fluids // *Molecules.* 2018. V. 23. № 11. P. 2854.
<https://doi.org/10.3390/molecules23112854>
72. Stejskal J., Sapurina I., Trchová M. Polyaniline nanostructures and the role of aniline oligomers in their formation // *Prog. Polym. Sci.* 2010. V. 35. № 12. P. 1420–1481.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.07.006>
73. Yuan J., Hu X., Zhao X., et al. Electrorheological effect of suspensions of polyaniline nanoparticles with different morphologies // *Polymers.* 2023. V. 15. № 23. P. 4568.
<https://doi.org/10.3390/polym15234568>
74. Allais C., Foot P., Singer R. Morphology-controlled stabilised polyaniline nanoparticles and their electrorheological properties // *Polym. Polym. Compos.* 2023. V. 31. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1177/09673911231162800>
75. Liu S., Wei H., Xia M., et al. Enhancing the performance of electrorheological fluids by structure design // *J. Colloid Interface Sci.* 2024. V. 675. P. 1052–1058.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.07.061>

76. Jekal S., Sa M., Chu Y.-R., et al. A study on enhanced electrorheological performance of plate-like materials via percolation gel-like effect // *Gels*. 2023. V. 9. № 11. P. 891.
<https://doi.org/10.3390/gels9110891>
77. Noh J., Jekal S., Kim J., et al. Vivid-colored electrorheological fluids with simultaneous enhancements in color clarity and electro-responsivity // *J. Colloid Interface Sci.* 2024. V. 657. P. 373–383.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.11.183>
78. Lee S., Noh J., Hong S., et al. Dual stimuli-responsive smart fluid of graphene oxide-coated iron oxide/silica core/shell nanoparticles // *Chem. Mater.* 2016. V. 28. № 8. P. 2624–2633.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04936>
79. Yoon C.-M., Jang Y., Lee S., et al. Dual electric and magnetic responsivity of multilayered magnetite-embedded core/shell silica/titania nanoparticles with outermost silica shell // *J. Mater. Chem. C*. 2018. V. 6. № 38. P. 10241–10249.
<https://doi.org/10.1039/C8TC03677B>
80. Kim H.M., Kang S.H., Choi H.J. Polyaniline coated ZnFe_2O_4 microsphere and its electrorheological and magnetorheological response // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2021. V. 626. P. 127079.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127079>
81. Kim H.M., Jeong J.Y., Kang S.H., et al. Dual electrorheological and magnetorheological behaviors of poly(N-methylaniline) coated ZnFe_2O_4 composite particles // *Materials*. 2022. V. 15. № 7. P. 2677.
<https://doi.org/10.3390/ma15072677>
82. Hong C.H., Jang H.S., Oh S.J., et al. Electric and magnetic field-responsive suspension rheology of core/shell-shaped iron oxide/polyindole microspheres // *Korea-Australia Rheol. J.* 2023. V. 35. № 2. P. 95–103.
<https://doi.org/10.1007/s13367-023-00056-z>
83. Wang S., Kwon Y.K., Choi H.J. Pickering emulsion polymerized poly(N-methylaniline)/ Fe_3O_4 nanocomposite particles and their dual electrorheological and magnetorheological responses // *Eur. Polym. J.* 2025. V. 232. № 5. P. 113955.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.113955>
84. Jeong J.Y., Kim S., Baek E., et al. Suspension rheology of polyaniline coated manganese ferrite particles under electric/magnetic fields // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2023. V. 656. P. 130438.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130438>
85. Gwon H., Kim H., Lee S. Gadolinium oxide-decorated graphene oxide-based dual-stimuli-responsive smart fluids // *Nanoscale*. 2025. V. 17. № 10. P. 5869–5877.
<https://doi.org/10.1039/D4NR04941A>
86. Anitas E.M., Munteanu A., Sedlacik M., et al. Magnetic and electric effects in magnetorheological suspensions based on silicone oil and polypyrrole nanotubes decorated with magnetite nanoparticles // *Results Phys.* 2024. V. 61. P. 107768.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107768>
87. Bica I., Anitas E.M., Gavrilovici A.M., et al. Tunable electrical conductivity of nickel-polypyrrole microparticle suspensions under electric and magnetic fields // *J. Mater. Chem. C*. 2025. V. 13. № 31. P. 15997–16005.
<https://doi.org/10.1039/D5TC01039J>
88. Sim B., Chae H.S., Choi H.J. Fabrication of polyaniline coated iron oxide hybrid particles and their dual stimuli-response under electric and magnetic fields // *Express Polym. Lett.* 2015. V. 9. № 8. P. 736–743.
<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2015.68>
89. Park D.E., Chae H.S., Choi H.J., et al. Magnetite-polypyrrole core-shell structured microspheres and their dual stimuli-response under electric and magnetic fields // *J. Mater. Chem. C*. 2015. V. 3. № 13. P. 3150–3158.
<https://doi.org/10.1039/c5tc00007f>
90. Zhang W.L., Tian Y., Liu Y.D., et al. Large scale and facile sonochemical synthesis of magnetic graphene oxide nanocomposites and their dual electro/magneto-stimuli responses // *RSC Adv.* 2016. V. 6. № 81. P. 77925–77930.
<https://doi.org/10.1039/C6RA12985D>
91. Kim J.N., Dong Y.Z., Choi H.J. Pickering emulsion polymerized polyaniline/zinc-ferrite composite particles and their dual electrorheological and magnetorheological responses // *ACS Omega*. 2020. V. 5. № 13. P. 7675–7682.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00585>
92. Lu Q., Jin H.-J., Choi H.J. Pickering emulsion polymerized Fe_3O_4 @graphene oxide-polystyrene composite particles and their electro/magnetorheological responses // *J. Mol. Liq.* 2022. V. 365. P. 120083.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120083>

93. *Ruzicka M.* Electrorheological fluids: Modeling and mathematical theory. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 38 p.
94. *Parthasarathy M., Klingenberg D.J.* Electrorheology: Mechanisms and models // *Mater. Sci. Eng. R Reports*. 1996. V. 17. № 2. P. 57–103.
[https://doi.org/10.1016/0927-796X\(96\)00191-X](https://doi.org/10.1016/0927-796X(96)00191-X)
95. *Liang Y., Huang D., Zhou X., et al.* Efficient electrorheological technology for materials, energy, and mechanical engineering: From mechanisms to applications // *Engineering*. 2023. V. 24. P. 151–171.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.01.014>
96. *Li X., Li C., Gao X., et al.* Like-charge attraction between two identical dielectric spheres in a uniform electric field: a theoretical study via a multiple-image method and an effective-dipole approach // *J. Mater. Chem. A*. 2024. V. 12. № 12. P. 6896–6905.
<https://doi.org/10.1039/D3TA07945G>
97. *Das D., Saintillan D.* On the absence of collective motion in a bulk suspension of spontaneously rotating dielectric particles // *Soft Matter*. 2023. V. 19. № 35. P. 6825–6837.
<https://doi.org/10.1039/D3SM00298E>
98. *Mester S., Horváth B., Szalai I.* Polarizabilities and electric field-induced forces in periodic two-component linear dielectric sphere chains // *J. Mol. Liq.* 2023. V. 370. P. 120939.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120939>
99. *Kach J.I., Walker L.M., Khair A.S.* Nonequilibrium structure formation in electrohydrodynamic emulsions // *Soft Matter*. 2023. V. 19. № 47. P. 9179–9194.
<https://doi.org/10.1039/D3SM01110K>
100. *Haque M.A., Maestas J.R., Zhu X., et al.* High-density and well-aligned hierarchical structures of colloids assembled under orthogonal magnetic and electric fields // *ACS Nano*. 2025. V. 19. № 1. P. 760–770.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.4c11957>
101. *Bhattacharya A., Chakraborty S.* Modulating the selective enrichment and depletion of ions using electrorheological fluids in variable-area microchannels // *Langmuir*. 2025. V. 41. № 4. P. 2347–2363.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04011>
102. *Chaudhary I., Kaushal M.* Pure elongation flow of an electrorheological fluid: insights on wall slip from electrorheology // *Soft Matter*. 2024. V. 20. № 15. P. 3313–3321.
<https://doi.org/10.1039/D3SM01448G>
103. *Saffari P.R., Ismail S.O., Thongchom C., et al.* Effect of magnetic field on vibration of electrorheological fluid nanoplates with FG-CNTRC layers // *J. Vib. Eng. Technol.* 2024. V. 12. № 3. P. 3335–3354.
<https://doi.org/10.1007/s42417-023-01048-7>
104. *Khorshidi K., Soltannia B., Karimi M., et al.* Nonlinear vibration of electro-rheological sandwich plates, coupled to quiescent fluid // *Ocean Eng.* 2023. V. 271. P. 113730.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113730>
105. *Salunkhe H., Thikane S., Kolekar A.* Electrorheological fluids: Mathematical theory and physics // *Math. Eng. Sci. Aerosp.* 2023. V. 14. № 3. P. 649–659.
<https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2023.1205140>
106. *Chung P.S., Jhon M.S., Choi H.J.* A universal yield stress equation for electrorheological fluids // *Phys. Fluids*. 2024. V. 36. № 8. P. 083329.
<https://doi.org/10.1063/5.0210728>
107. Science and technology of electrorheological materials // *Progress in Electrorheology* / ed. Havelka K.O., Filisko F.E. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 1995. 372 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1036-3>
108. *Dong Y.Z., Seo Y., Choi H.J.* Recent development of electro-responsive smart electrorheological fluids // *Soft Matter*. 2019. V. 15. № 17. P. 3473–3486.
<https://doi.org/10.1039/C9SM00210C>
109. *Zhang C., Zhang J., Kang J., et al.* Electrorheological effects of waxy crude oils under high-voltage AC electric field // *Fuel*. 2023. V. 340. P. 127494.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127494>

110. Xie Y.-W., Li H.-Y., Zhang C.-Y., *et al.* A further investigation to mechanism of the electrorheological effect of waxy oils: Behaviors of charged particles under electric field // *Pet. Sci.* 2023. V. 20. № 2. P. 1247–1254.
<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.08.022>
111. Wang H., Lu Y. Significant reduction of the viscosity of waxy model oils by DC electric field // *Geoenergy Sci. Eng.* 2025. V. 251. P. 213905.
<https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213905>
112. Fernández-Silva S.D., Delgado M.Á., Roman C., *et al.* Active control of friction in electrified ball bearing prototypes using electro-sensitive clay mineral-based lubricating fluids // *Friction.* 2025. V. 13. № 5. P. 9441023.
<https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441023>
113. Sun H., Hu X., Zhao X., *et al.* Hollow poly(ionic liquid)/ α -Al₂O₃ composite particles prepared by microwave-assisted Pickering emulsion polymerization and their electrorheological polishing property // *ACS Appl. Polym. Mater.* 2023. V. 5. № 8. P. 6412–6420.
<https://doi.org/10.1021/acsapm.3c01001>
114. Kęsy Z., Musiałek I., Choi S.-B. Design optimization of a hydrodynamic brake with an electrorheological fluid // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. № 2. P. 1089.
<https://doi.org/10.3390/app13021089>
115. Cao X., Zhao J., Mao L., *et al.* Investigation of a 2-DOF GER fluid damper in cut mode // *Int. J. Mech. Sci.* 2024. V. 274. P. 109258.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109258>
116. Cao X., Zhao J., Sun Z., *et al.* Investigation of a GER damper using the cut submode for vibration suppression in rotor systems with transmission shafts // *Sci. China Technol. Sci.* 2025. V. 68. № 5. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s11431-024-2868-3>
117. Kuznetsov N.M., Banin E.P., Krupnin A.E., *et al.* Electroresponsive materials for soft robotics // *Nanobiotechnology Rep.* 2023. V. 18. № 2. P. 189–206.
<https://doi.org/10.1134/S2635167623700039>
118. Pan Y., Liu X.-J., Zhao H. Stretchable and conformable variable stiffness device through an electrorheological fluid // *Soft Matter.* 2022. V. 18. № 48. P. 9163–9171.
<https://doi.org/10.1039/D2SM01362B>
119. Jing H., Hua L., Long F., *et al.* Variable stiffness and fast-response soft structures based on electrorheological fluids // *J. Mater. Chem. C.* 2023. V. 11. № 35. P. 11842–11850.
<https://doi.org/10.1039/D3TC01563G>
120. Bhattacharyya M., Haridas C.P.A., Kaushal M., *et al.* Silylated carbon nanofiber/polydimethylsiloxane based printable electrorheological and sensor inks for flexible electronics // *Small Methods.* 2025. V. 9. № 7. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1002/smt.202401741>
121. Sadi F., Holthausen J., Stallkamp J., *et al.* Development of novel hydraulic 3D printed actuator using electrorheological fluid for robotic endoscopy // *Actuators.* 2024. V. 13. № 4. P. 119.
<https://doi.org/10.3390/act13040119>
122. Rijo P.C., Galindo-Rosales F.J. Electrorheological characterization of complex fluids used in electrohydrodynamic processes: Technical issues and challenges // *Appl. Rheol.* 2024. V. 34. № 1. P. 20240024.
<https://doi.org/10.1515/arh-2024-0024>
123. Munteanu L., Munteanu A., Sedlacik M. Electrorheological fluids: A living review // *Prog. Mater. Sci.* 2025. V. 151. № 10. P. 101421.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101421>
124. Wang Y., Ma R., Nie W., *et al.* Enhanced electrorheological performance of core–shell-structured polymerized ionic liquid@doubly polymerized ionic liquid microspheres prepared via evaporation-assisted dispersion polymerization // *Langmuir.* 2023. V. 39. № 39. P. 14006–14014.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01745>