УДК 544.77:53.097

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

© 2025 г. Н. М. Кузнецов[1, *], С. Н. Чвалун[1, 2]

[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, Россия

[2]Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова Российской академии наук, 117393, Профсоюзная ул., д. 70, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 07.08.2025 г.
После доработки 25.08.2025 г.
Принята к публикации 25.08.2025 г.

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

RECENT ADVANCES IN ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS

© 2025 г. N. M. Kuznetsov, S. N. Chvalun

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

Термины:

диэлектрическая проницаемость – dielectric permittivity,

металл-органические каркасные структуры – metal-organic frameworks,

полиионные жидкости – polyionic liquids,

предел текучести – yield stress,

стимул-чувствительные материалы – stimuli-responsive materials,

частицы с высоким характеристическим отношением – particles with high aspect ratio

электрореологические жидкости – electrorheological fluids

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ММТ – монтмориллонит;

ПАВ – поверхностно-активное вещество;

ПАНИ – полианилин;

ПС – полистирол;

ТЭОС – тетраэтоксисилан;

BCNIm – 1,3-бис(цианометил)имидазолия;

iCOF – ионно-ковалентные органические каркасные структуры;

ITO – оксид индия-олова;

FA – формамидиний;

HEC – гидроксиэтилцеллюлоза;

HMA – гексилметакрилат;

MA – метиламмоний;

MC – микроцеллюлоза;

MOF – металл-органические каркасные структуры;

NC – наноцеллюлоза;

PEG – полиэтиленгликоль;

PEO – полиэтиленоксид;

PIL – полиионнная жидкость;

PIn – полииндол;

P[MTMA][TFSI] – поли([2-(метакрилоилокси)этил]триметиламмония бис(трифторметансульфонил)имид);

P[MTMA][MPTFSI] – поли([2-(метакрилоилокси)этил]триметиламмония [3-(метакрилоилокси)-пропилсульфонил]-(трифторметансульфонил)имид);

P[MTMA][PF_6] – поли(2-(метакрилоилокси)этилтриметиламмоний][гекса-фторфосфат];

PNMA – поли-N-метиланилин;

Poly-LiTB – полиборат винной кислоты с ионами лития;

Poly-NaTB – полиборат винной кислоты с ионами натрия;

PPy – полипиррол;

PTPA – политрифениламин.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7
НОВЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ 8
Частицы со структурой ядро оболочка 9
Современные наполнители различной природы 14
Роль формы, размера и структуры 21
ЖИДКОСТИ С ДВОЙНЫМ ОТКЛИКОМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ/МАГНИТНОЕ ПОЛЕ 29
ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ 33
ОБЛАСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА 44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 55
ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ 56
СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ 57
КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ 57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 58

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 ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ 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

E. Pavlikova и др. рассмотрели в качестве наполнителя для электрореологических жидкостей гибридные наполнители на основе углеродных материалов с оболочкой из диоксида кремния, полученные карбонизацией из глюкозы и 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 при 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 гибридизации 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 С–О связей. Поэтому, несмотря на промежуточное значение силы диэлектрической релаксации ($\Delta\varepsilon$) 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.

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

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 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 электрореологический отклик дисперсии. Предел текучести при 10 масс. % содержании 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/MoS_2/SiO_2 [44]. Частицы получали в две стадии: сначала формировали каркас MOF в присутствии предварительно синтезированных частиц MoS_2 и далее на поверхности полученных частиц синтезировали оболочку SiO_2 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 SiO_2 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 MoS_2. 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 La^{3+} в качестве допанта на электрореологическое 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 10 масс. %, что согласуется с ранее проведенными исследованиями. Большое количество ионов La^{3+} (100 мг допанта $La(NO_3)_3 \cdot nH_2O$ 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.

Рис. 2. Схематическая иллюстрация получения тройных композиционных наполнителей состава MIL-125/MoS_2/SiO_2 (а), микрофотография просвечивающей электронной

микроскопии полученных частиц с содержанием 0.1 г MoS_2 и 2 мл ТЭОС в исходной реакционной смеси (б), типичная слоистая структура MoS_2 в промежуточном продукте MIL-125/MoS_2 (в). Адаптировано из работы [44]. Copyright © 2024, American Chemical Society.

Отдельным классом соединений, которые получили пристальное внимание в области электрореологии в последние годы, являются полиионнные 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 (**P[MTMA][TFSI]**) и поли([2-(метакрилоилокси)этил]триметиламмония [3-(метакрилоилокси)-пропилсульфонил]-(трифторметансульфонил)имид)а (**P[MTMA][MPTFSI]**), а также их комбинации со структурой ядро-оболочка (**P[MTMA][TFSI]@[MTMA][MPTFSI]**). Авторы отмечают слабый электрореологический отклик частиц P[MTMA][MPTFSI], и потерю стабильности жидкостей на основе P[MTMA][TFSI] с ростом температуры до 40°C. Однако комбинированный наполнитель P[MTMA][TFSI]@[MTMA][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 P[MTMA][TFSI] была выбрана другая PIL поли(2-(метакрилоилокси)этилтриметиламмоний][гекса-фторфосфат]) (**P[MTMA][PF_6]**), а также их сополимеры с гексилметакрилатом (**HMA**) [47]. Роль HMA оказалась различной, так жидкости на основе сополимерных частиц P[MTMA][TFSI] проявляют повышенный эффект, а в случае P[MTMA][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. % P[MTMA][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, регулируемыми размерами пор и хорошей стабильностью [48]. R. Ma и др. исследовали электрореологическую активность [TFSI] с катионом 1,3-бис(цианометил)имидазолия (**[BCNIm]**) [49]. Для получения ионно-электронных каркасов (ieCOF) [BCNIm][TFSI] нагревали в токе азота при температурах 370°C, 390°C, 420°C и 440°C, что приводит к различному содержанию ионов и степени карбонизации структуры конечного продукта. В результате образуются частицы неправильной формы размером 3-5 μм. С повышением температуры края частиц становятся значительно острее, что указывает на рост твердости ieCOF. Смешанные ионно-

электронные системы ieCOF (полученные при 390°C и 420°C) обладают более сильной межфазной поляризацией по сравнению с ионно- и электронно-доминируемым каркасом (полученным при 370°C 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°C 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 в виду 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 электрореологических жидкостей. Отмечена

перспективность применения коллоидных систем на основе полиэлектролитов бороорганических соединений в качестве стимул-чувствительных материалов.

M. Cabuk и др. рассмотрели в качестве наполнителя электрореологических 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 электрореологического 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-хитозан.

J. P. Soares с соавторами исследовали влияние небольшого количества оксида железа (III) в составе частиц диоксида титана на электрореологический 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 электрореологическое 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 электрореологии 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 электрореологических 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 электрореологического отклика нативных алюмосиликатов используют подходы к их модификации. Y. Liu и др. интеркалировали полиэтиленоксид (**PEO**) в структуру стопок ММТ [57]. Отмечается, что PEO был введен исключительно в межслоевое пространство и не содержится на поверхности пластин. При этом PEO не замещает компенсационные катионы. Добавление PEO 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-PEO при 3 кВ/мм.

O. Erol и др. развили область применения электропроводящих полимеров в качестве наполнителей электрореологических жидкостей [58]. Политрифениламин (**PTPA**) и его производное, функционализированное карбоновой кислотой (**PTPA-COOH**), 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 PTPA проявляют достаточно высокую электрореологическую активность в дисперсии, которая дополнительно возрастает при функционализации. Статический предел текучести достигает ~220 и 375 Па для жидкостей с PTPA и PTPA-

COOH при 10 масс. % и 3.5 кВ/мм соответственно. Оба материала демонстрируют стабильный отклик в режиме многократного стимулирования. Кроме того, более разветвленная поверхность частиц PTPA-COOH 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 A – катионы цезия, формамидиния (**FA**) и метиламмония (**MA**), B – 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

Рис. 3

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 анизометрии 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 анизометрия частиц также обуславливает их повышенную седиментационную устойчивость в силиконовом масле. Более детально исследования, посвященные роли формы частиц и применению анизометричных наполнителей в электрореологических жидкостях, рассмотрены далее.

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).

Роль формы, размера и структуры

Создание низкоконцентрированных жидкостей связано с использованием высокопористых наполнителей, а также частиц с высоким характеристическим отношением. В этом контексте, полимеры представляют особенный интерес в виду 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 формовании композиционного высокопористого 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. % содержании 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 электрореологический 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].

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.

S.D. Fernández-Silva и др. визуализировали структуру дисперсий наночастиц целлюлозы с высоким характеристическим отношением в касторовом масле *in situ* в процессе электрореологических 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 $с^{-1}$) структуры наклоняются и смещаются, однако сохраняют целостность во всем исследуемом диапазоне напряженностей электрического поля (до 4 кВ/мм), при высокой скорости сдвига (30 $с^{-1}$) 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 о управлении 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 анизометрией при исследовании электрореологических свойств

жидкостей невозможно. Поэтому, Y. Wang и др. синтезировали монодисперсные 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 μм). 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 μм приводит к снижению напряжение 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, нанофибриллярной и пластинчатой морфологии. Для получения пластинок авторы использовали оксид графена в качестве матрицы-шаблона [73]. Однако, авторы отмечают, что в виду 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 нанофибрилл, нанопластин 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 не типично, поскольку ранее ряд исследований показал активационное действие малых количеств воды. Максимальное значение предела текучести ~824 Па достигнуто для 15 масс. % суспензии предварительно осушенных нанофибрилл ПАНИ при напряженности электрического поля 3.2 кВ/мм. В исследовании также отмечается, что полые сферы поли (о-анизидин)а не проявляют электрореологического эффекта в виду низкой поляризуемости.

S. Liu и др. сообщают об армирующей роли добавки нановолокон 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 гель-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 полииндолом (**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 предела текучести составили ~140 и 17 Па при 2 кВ/мм и 171 кА/м соответственно.

H. 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 в виду 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.

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 PPy/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.

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 многофункциональных 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.

X. Li и др. рассмотрели классическую задачу взаимодействия двух диэлектрических сфер в однородном электрическом поле [96]. Оригинальность работы заключается в сравнении метода множественных изображений, включающий численный подход, с классической оценкой в приближении эффективного диполя. Размеры сфер были заданы 3.15 мм, расстояние между ними составляло 0.5 мм. 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} мм 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 водят 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 и D. Saintillan моделировали образования цепочек из сферических частиц в электрореологической 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,

демонстрирует коллективное движение рядом со стенкой. В исследовании обнаружено, что в трёх 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 использовались 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 и 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 и 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 трёх 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 трёх измерениях капли образуют цепи или объединяются в единый динамический слой.

J. Yuan и др. провели многомасштабное моделирование для объяснения результатов электрореологического 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 трёхмерных 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.

M.A. Haque 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 (**ITO**), зазор h = 100 мкм. Между пластинами ITO 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.

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.

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 её 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 электрическое поле, ортогональное оси канала. Поперечный диаметр канала считается малым по сравнению с длиной, поэтому предполагается однонаправленный поток жидкости и перенос ионов. Поскольку электрического 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)-со-[(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 усреднённые 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 напряжённости 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 21 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 продолжаются исследования применения электрореологических жидкостей как в традиционных, так и относительно новых областях. Далее более детально рассмотрим некоторые их 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 значений 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 $C_{22}H_{14}CoO_4$. 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 нарушению 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 ММТ (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-Al_2O_3 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 (Рисунок 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 ведет 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-Al_2O_3) в жидкости не позволяет эффективно полировать поверхность, предположительно из-за низких значений предела текучести, т. е. недостаточной прочности (твердости) колончатых структур.

Рис. 7. Результаты электрореологического 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 электрореологической 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 электрореологической 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.

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, 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 электрореологической жидкости квадрату напряженности электрического поля, временная константа отклика в электрическом поле и диэлектрическая проницаемость жидкости. В качестве электрореологической 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, поглощаемая 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. Cao 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) (**Рисунок 7б)**. Во время работы в режиме «разрезания» ориентированная электрическим полем колонна частиц растягивается до разрыва при высокой деформации, превышающей силы взаимодействия между частицами (F_{cf}), с дальнейшей рекомбинацией частиц и восстановлением структуры в области отверстий активной платы. При этом в зависимости режима демпфирования, т.е. вращательный или поступательный, 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 электрореологическую 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]. Электрореологические жидкости также находят применение при разработке элементов мягких робототехнических устройств.

Так, Y. Pan и др. разработали элемент переменной жесткости из мягких материалов на основе электрореологической жидкости [118]. Устройство представляет собой капсулу для электрореологической 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 электрореологическую 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 электрореологического 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, в виду 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 (**Рисунок 7в(А)**). Мягкую оболочку формовали из двухкомпонентного силикона (PDMS 184), 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 (**Рисунок 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 (**Рисунок 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 пробою 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 ограничивает 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 стериолитографии использовали фотополимерный материал Elastic 50A. В качестве электрореологической 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 ±10° 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 электрореологии за последние несколько лет. Традиционными остаются исследования, связанные с разработкой новых наполнителей, проявляющих повышенную электрореологическую 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 высокоанизометричные 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 электрореологического 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 электрореологии 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 электрореологических 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 электрореологических 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 электрореологических эластомеров [95, 122, 123].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания НИЦ «Курчатовский институт» и при частичной финансовой поддержке РНФ (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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Winslow W.M.* Induced fibration 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

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., Городкин Р.Г., и др.* Электрореологический эффект / ред. А.В. Лыков. Минск: Наука и техника, 1972. 176 с.

14. *Gindin L.G., Vol'pyan 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. *Mokeev 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

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 TiO_2 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 кремнеземов 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 electroreological activity of titanium dioxide nanopowders // J. Phys. Chem. B. 2017. V. 121. № 27. P. 6732–6738.

https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.7b04131

26. *Egorysheva A.V., Kraev A.S., Gajtko O.M., et al.* High electrorheological effect in $Bi_{1.8}Fe_{1.2}SbO_7$ 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

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 TiO_2 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/MoS_2/SiO_2 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 электрореологические 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-methyl aniline) 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

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-Al_2O_3 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 CP 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/smtd.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

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

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

Рис. 2. Схематическая иллюстрация получения тройных композиционных наполнителей состава MIL-125/MoS_2/SiO_2 (а), микрофотография просвечивающей электронной микроскопии полученных частиц с содержанием 0.1 г MoS_2 и 2 мл ТЭОС в исходной реакционной смеси (б), типичная слоистая структура MoS_2 в промежуточном продукте MIL-125/MoS_2 (в). Адаптировано из работы [44]. Copyright © 2024, American Chemical Society.

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).

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.

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 PPy/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.

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.

Рис. 7. Результаты электрореологического 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 электрореологической 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 электрореологической 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.

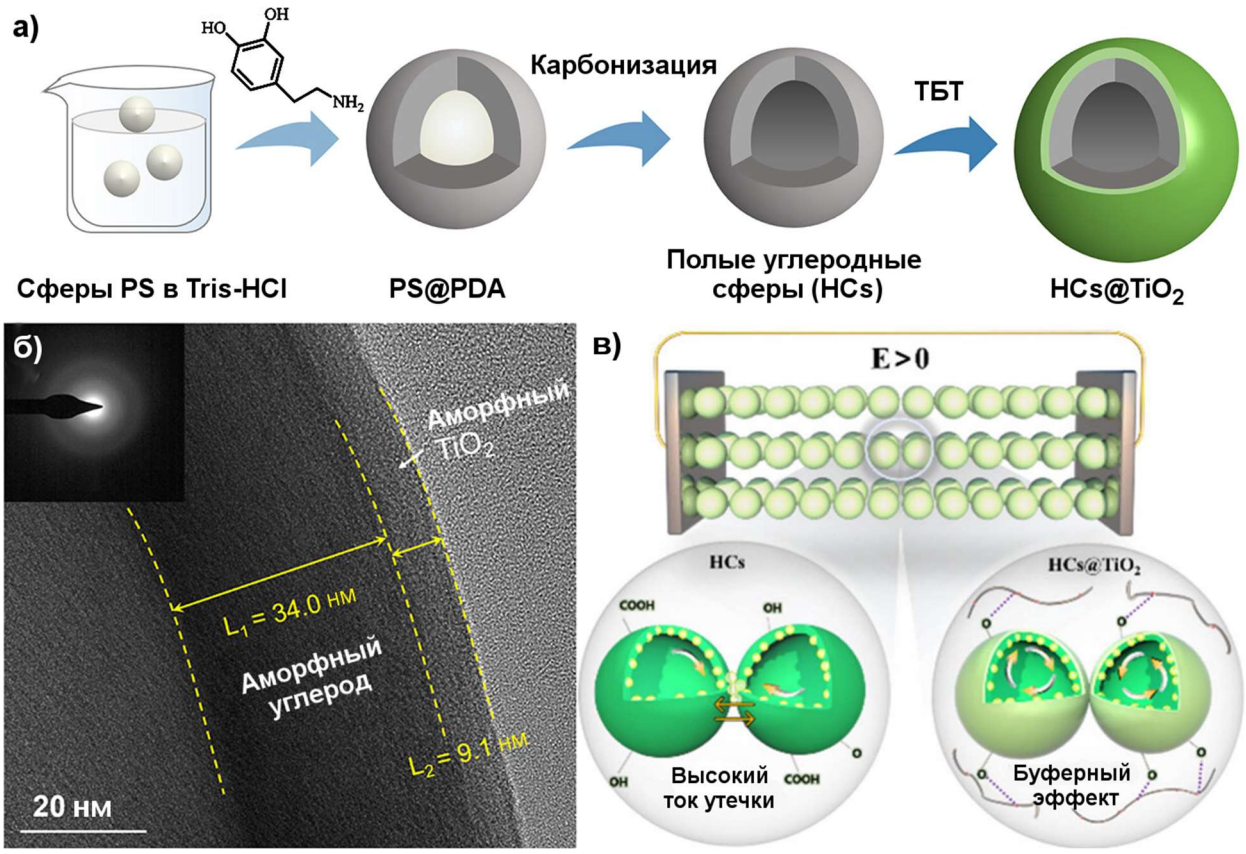

Рисунок 1. Кузнецов

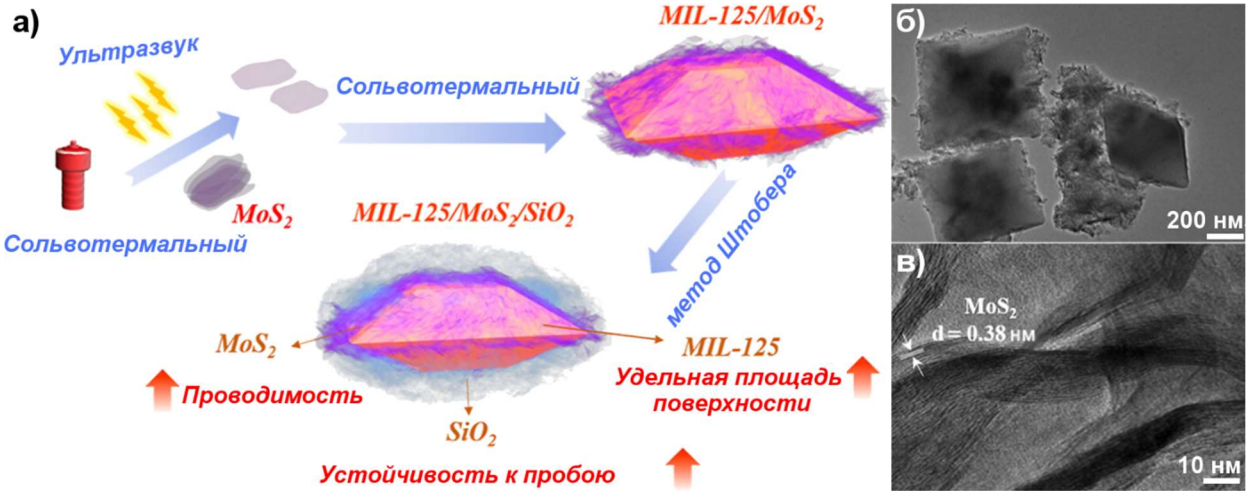

Рисунок 2. Кузнецов

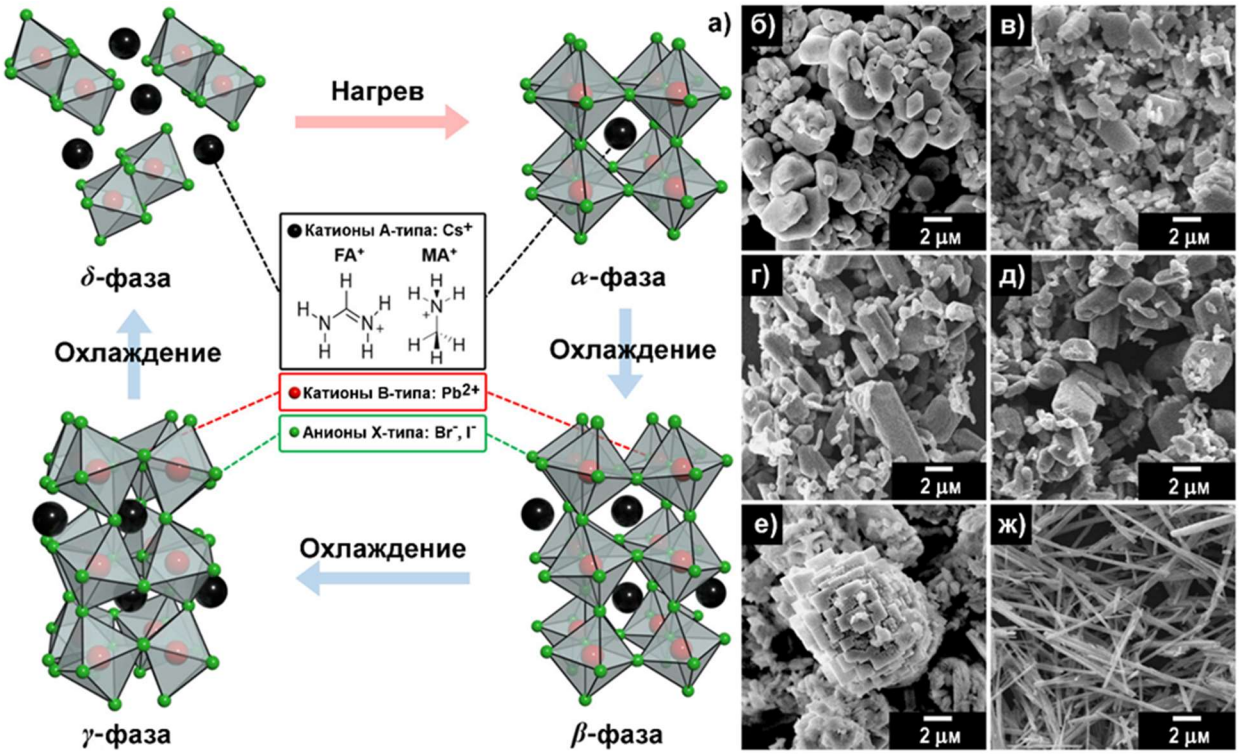

Рисунок 3. Кузнецов

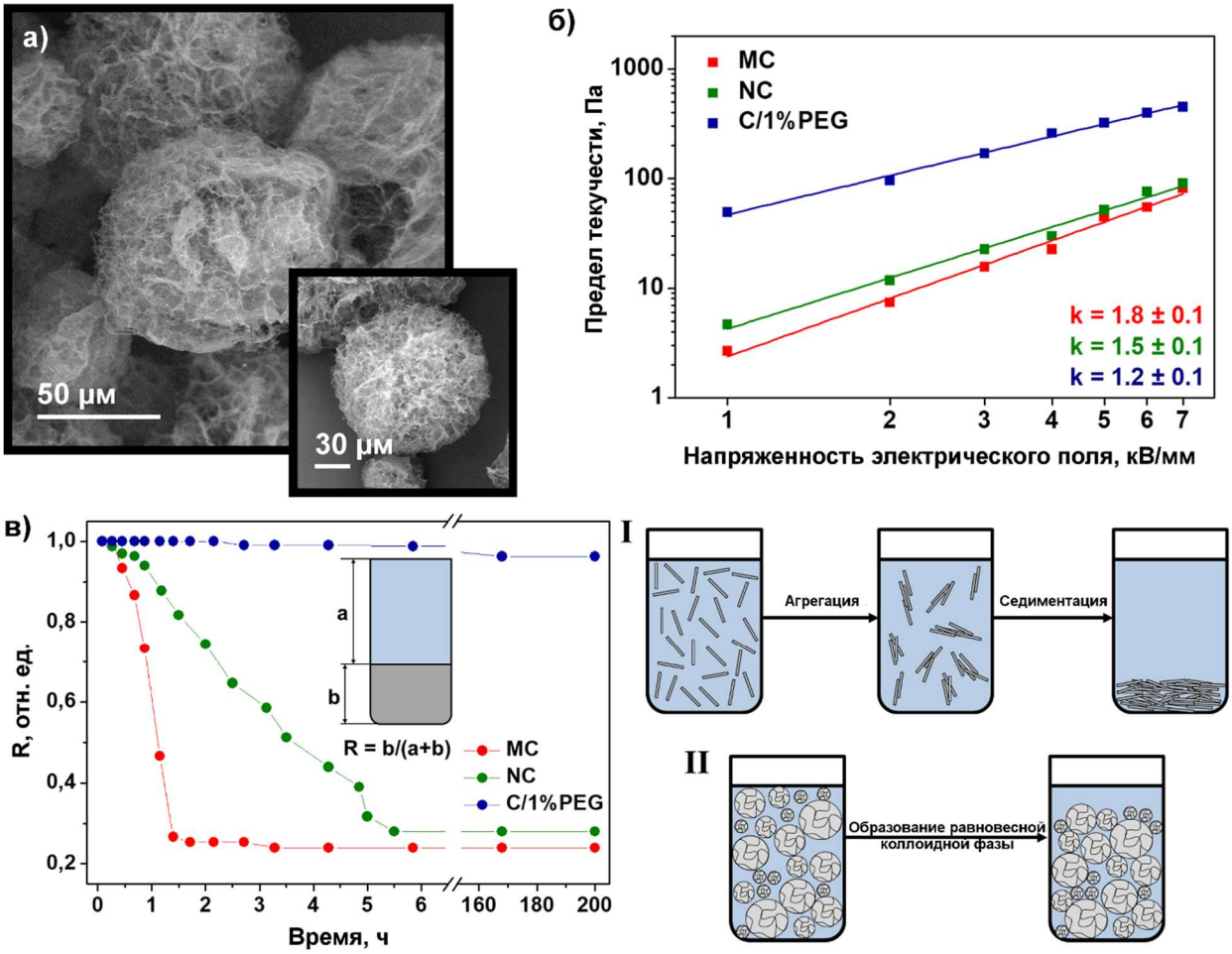

Рисунок 4. Кузнецов

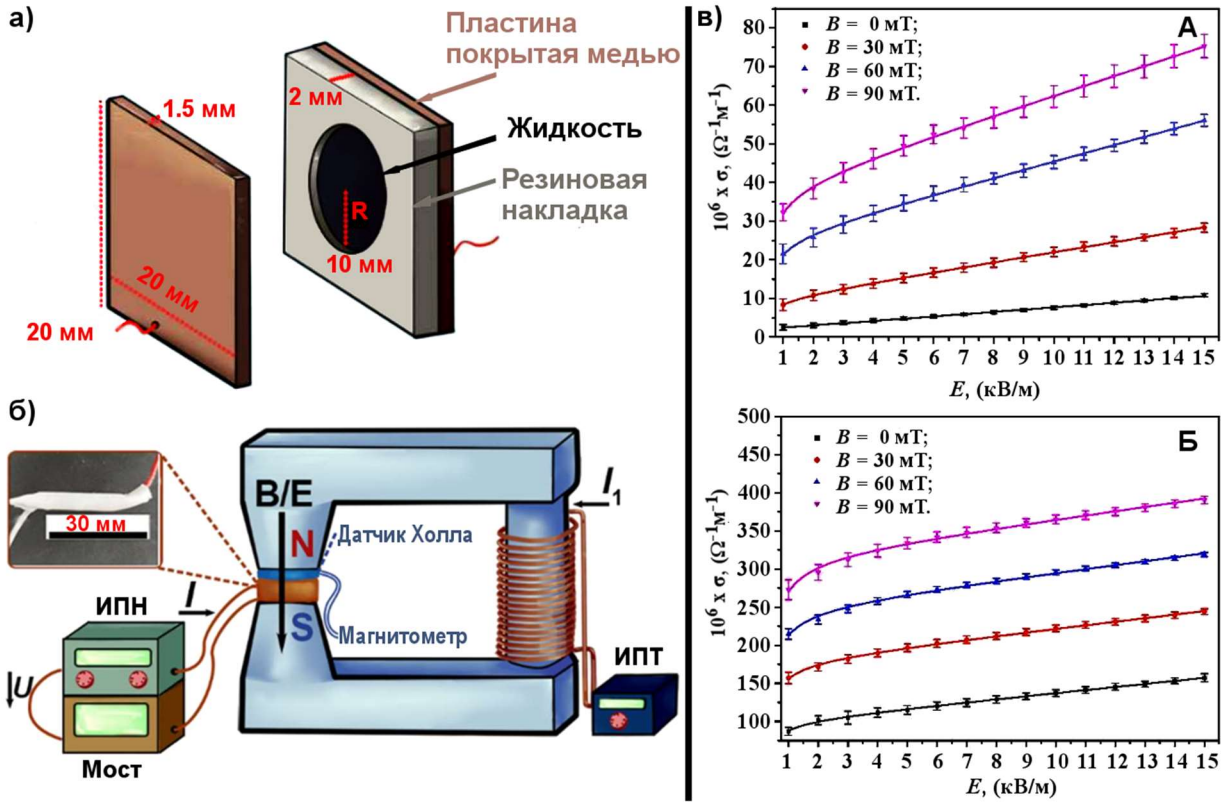

Рисунок 5. Кузнецов

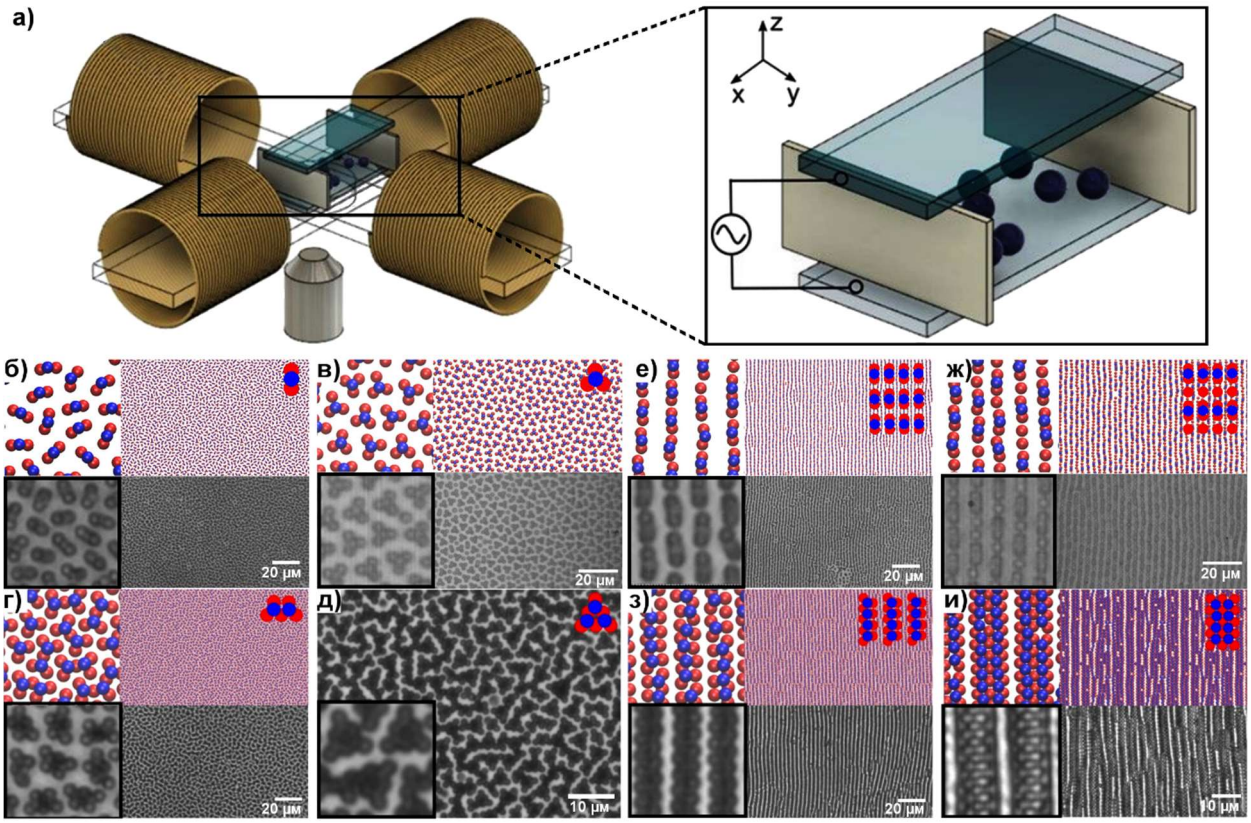

Рисунок 6. Кузнецов

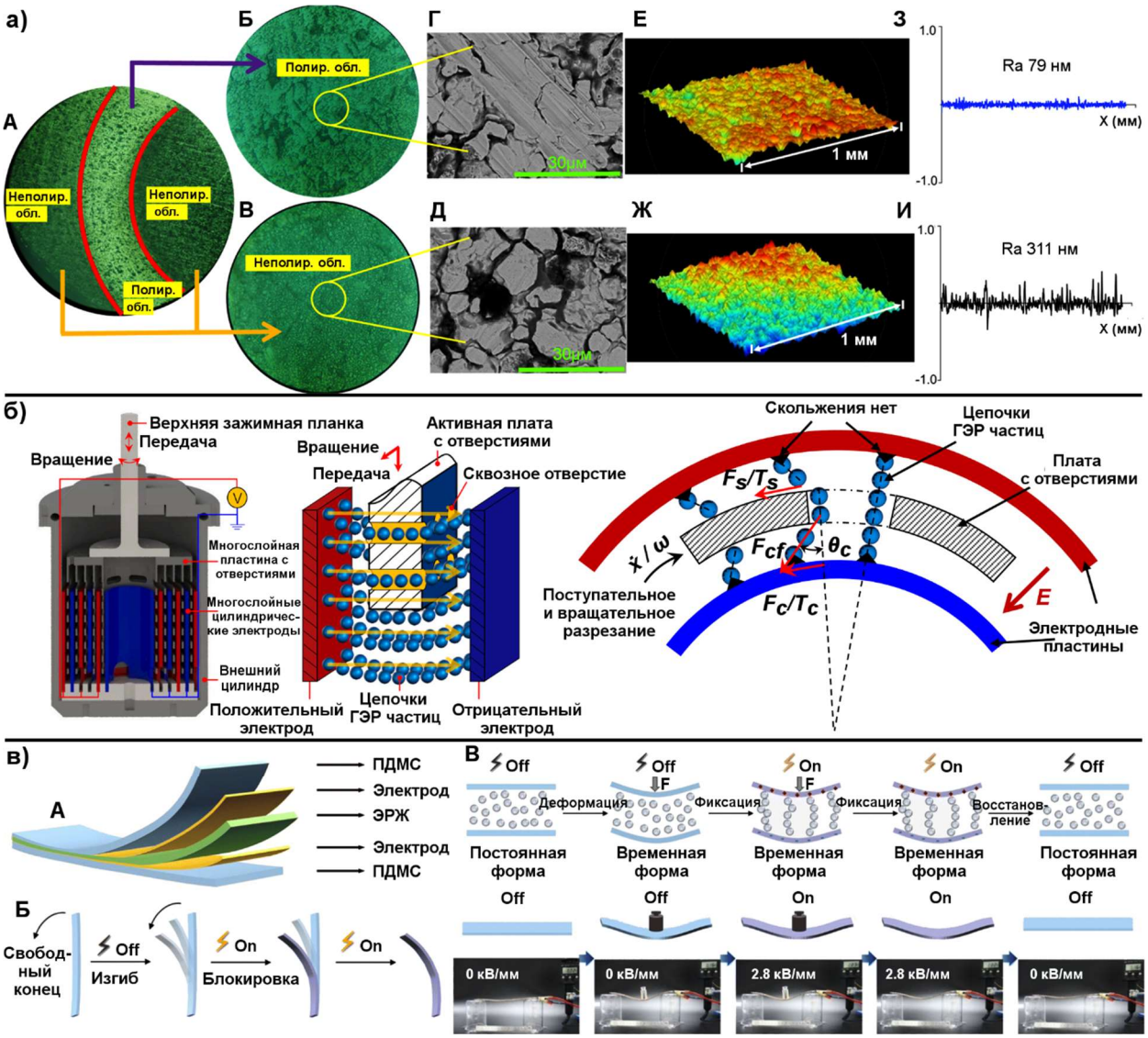

Рисунок 7. Кузнецов

ТАБЛИЦЫ

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

Материал		**Тип дисперсионной среды и её вязкость**	**Морфология наполнителя**	**ρ, г/см³**	**Концентрация**	**$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.**	**E_{max}, кВ/мм**	**J_{max}, μA/см²**	**Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па**	**Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$**	**R, %**	**$K_{эфф.}$, отн. ед.****
Карбонизированная Glu [37]		–	Сферические ~400-500 нм	~0.6	5 масс. %	2.36	1	439.7	~180*	-	~97	36000
Glu@SiO_2 [37]			Сферические со структурой ядро/оболочка ~400-500 нм, плотная оболочка толщиной несколько нм	-		0.82	2	813.1	~60*	1.57	~51	390
Glu@m-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
BTO@NCs [38]	Время синтеза оболочки:12 ч	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
	24 ч					3.25	4		~600			5100
	48 ч					4.30	3		~620			5200
HCs@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
					10 масс. %	-			~1500	2 (<2 кВ) 1.5 (>2 кВ)		160
					15 масс. %	-			~5000	2 (<1.5 кВ) 1.5 (>1.5 кВ)		280

Материал		Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^2	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	*R*, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
GL-Plate [40]		Силиконовое масло 100 сСт	Пластинчатая, длиной несколько десятков μм, толщиной 1.3 μм	-	3 масс. %	-	4	-	3.5	-	24	30
GL-Plate@TiO_2 [40]			Пластинчатая со структурой ядро оболочка, длиной несколько десятков μм, толщиной 1.5 μм						25.5		35	270
HL-Plate@TiO_2 [40]			Пластинчатая полая, длиной несколько десятков μм, толщина стенки 160 нм						75.1		63	820
MOF-Ti@PANI [42]	Количество добавленного PANI: 0.15	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
	0.20			0.976	10 масс. % (9.29 об. %)	0.48		58.23	~200	1.18		660
	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

Материал		Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^2	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	*R*, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
	0.40			1.003	10 масс. % (9.07 об. %)	-		51.99	~130	0.93		430
MOF-Ti@ SiO_2 [43]	Количество добавленного ТЭОС: 0.75	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
	1.00					-		>0.1	~326	1.14		1800
	1.25					3.69		0.05	~275	1.12		1500
	1.50					-		0.04	~162	0.98		540
MOF-Ti@ MoS_2 @ SiO_2 [44]	Количество добавленного MoS_2 и ТЭОС: 0.1-1	Силиконовое масло (диметилсилоксан)	Частицы ромбовидной формы с шероховатой поверхностью и структурой ядро-оболочка размером 0.5-1 μм	-	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	3.0	77.95	~180	1.51		1700
	0.15-2					-		31.18	~180	1.57		1700
	0.2-2					-		43.65	~150	1.47		1700
MOF-Ti@ La [45]	Количество добавленного $La(NO_3)_3 \cdot nH_2O$: 30 мг	Силиконовое масло (диметилсилоксан)	Частицы близкие к сферическим переходящие в квадратные с увеличением размера от 0.2 до 2 μм с ростом количества допанта	-	10 масс. %	1.00	2.5	15.59	~300	-	100	600
	40 мг					-		32.22	~350		-	700
	50 мг					-		99.78	~150		-	400
	75 мг					0.66		55.08	~110		-	400

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^2	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	*R*, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
100 мг					0.64	2.0	>100	~150		92	750
P[MTMA][TFSI] [124]	Силиконовое масло 50 сСт	Сферические частицы диаметром 1.02 μм	1.62	15 об. % (~22.8 масс. %)	5.6	3	~40	~390	-	-	160
[MTMA][MPTFSI] [124]		Сферические частицы диаметром 1.25 μм	1.81	15 об. % (~24.8 масс. %)	0.18		<1	~35			6
P[MTMA][TFSI]@ [MTMA][MPTFSI] [124]		Сферические частицы диаметром 0.98 μм 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 (диметилсилоксан) 50 сСт	Сферические частицы диаметром 2-3 μм	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

Материал		Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя		ρ, г/см³	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см²	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
[BCNIm] [TFSI] [49]	Температура отжига: 370°C	Силиконовое масло 50 сСт	Частицы неправильной формы размером <3-5 μм		-	20 об. %	~2.7	3	~200	~545	1.04	-	360
	390°C						~4.7		~52	~1730	1.60		1400
	420°C						~5.3		~70	~1590	1.62		660
	440°C						~5.3		~80	~1230	1.48		680
Poly-LiTB [50]		Силиконовое масло 1 Па*с	Частицы неправильной формы размером <20 μм		-	10 масс. %	0.57	2	-	~110*	1.60	-	270
						15 масс. %	1.00			~120*	1.75	-	200
						20 масс. %	1.32			265*	1.96	82	220
						25 масс. %	1.60			~300*	1.42	-	120
Poly-NaTB [50]					-	10 масс. %	0.66			~80*	1.33	-	130
						15 масс. %	1.22			~105*	1.16	-	110
						20 масс. %	1.25			195*	1.50	84	100
						25 масс. %	1.35			~210*	1.48	-	60
ПАНИ-графт-хитозан [51]		Силиконовое масло 1 Па*с	Частицы неправильной формы размером 100 нм		0.92	15 об. % (14.4 масс. %)	-	3	-	212	1.5	76	70
Fe_2O_3-TiO_2 [52]	Содержание Fe_2O_3: 0 масс. %	Силиконовое масло 350 сСт	Частицы близкие к сферическим	973 нм	4.13	15 масс. % (4 об. %)	6.50	1.5	1.42×10^{-3}	~33	-	-	25
	0.5 масс. %			544 нм	4.05		7.40	4	9.77×10^{-4}	~166	2.69 (<2 кВ) 1.70 (>2 кВ)	69	180
	1.0 масс. %			456 нм	4.04		3.25		9.70×10^{-4}	~177	2.19 (<2 кВ) 1.61 (>2 кВ)	71	190
	1.5 масс. %			451 нм	4.04		3.89		9.36×10^{-4}	~170	1.90 (<2 кВ) 1.60 (>2 кВ)	76	190

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^2	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	*R*, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
Гётит [53]	Силиконовое масло (полидиметилсилоксан) 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
Гётит покрытый мочевиной [53]				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 (диметилсилоксан, KF-96) 50 сСт	Стопка пластины с межслоевым расстоянием 1.26 нм	2.51	15 об. % (31.6 масс. %)	~3.17	1	62	~35*	-	-	110
ММТ-PEO [57]		Стопка пластины с межслоевым расстоянием 1.71 нм, содержание PEO 13 масс. %	2.12	15 об. % (28.0 масс. %)	~1.42	3	0.31	~92			6
PTPA [58]	Силиконовое масло (диметилсилоксан) 1 Па*с	Сросшиеся наночастицы μм 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
				10 масс. %	1.55			~170	1.4	87	140
PTPA-COOH [58]			0.91	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

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^2	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	*R*, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
$FAPbBr_3$ [60]	Силиконовое масло 100 сСт	Частицы неправильной формы размером <20 μм	-	3 масс. %	0.47	3	-	3.6	-	~18	15
$FAPbI_3$ [60]					0.63			5.8	-	~15	30
$MAPbBr_3$ [60]					0.64			4.0	-	~38	20
$MAPbI_3$ [60]					0.74			4.4	-	~48	40
$CsPbBr_3$ [60]					0.69			5.0	-	~20	25
$CsPbI_3$ [60]		Высокоанизометричные стержни длиной ~10 μм (L/D > 10)			3.24			99.4	2	85	510
NC [64]	Силиконовое масло (полидиметилсилоксан) 100 сСт	Высокоанизометричные стержни длиной 100 ± 20 нм (L/D = 16 ± 2)	-	1 масс. %	-	7	-	23	1.5	28	7500
MC [64]		Частицы неправильной формы размером 34 ± 12 μм (L/D = 3 ± 1)						16	1.8	24	5200
C/1%PEG [64]		Сферические высокопористые частицы с высокой полидисперсностью и наиболее вероятным размером 70 μм						170	1.2	96	1800
NC [65]	Оливковое масло 80 мПа*с	Высокоанизометричные стержни длиной 100 ± 20 нм (L/D = 16 ± 2)	-	1 масс. %	0.22	6	<4	110	1.2	20	37000
MC [65]		Частицы неправильной формы размером 34 ± 12 μм (L/D = 3 ± 1)			0.03	7	0.25	65	2.2 (<3 кВ) 0.9 (>3 кВ)		22000

Материал		Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^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] [67]	L/D: 1	Силиконовое масло (диметилсилоксан, KF-96) 50 сСт	Монодисперсные сферические частицы диаметром 3.1 μм	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
	1.9		Монодисперсные элипсоидные частицы длиной ~4.75 μм и диаметром ~2.5 μм		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
					15 об. %	~2.3			392		-	5600
	2.8		Монодисперсные элипсоидные частицы длиной ~6.0 μм и диаметром ~2.1 μм		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
					10 об. %	~1.4			~317		-	6600
					15 об. %	~2.6			~563		-	8100
	4.5		Монодисперсные элипсоидные частицы длиной ~8.5 μм и диаметром ~1.9 μм		1 об. %	~0.15			~55		-	11000
					2.5 об. %	~0.68			~111		-	8800
					5 об. %	~0.90			~159		~41	6400
					7.5 об. %	~1.6			~218		-	6000
					10 об. %	~2.1			~420		-	8800
					15 об. %	~3.5			~748		-	11000

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см³	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см²	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
7.3		Монодисперсные элипсоидные частицы длиной ~10.2 μм и диаметром ~1.4 μм		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
P[MTMA] [TFSI] [70]	Силиконовое масло	Монодисперсные сферические частицы 4.40 ± 0.85 μм	1.62	20 об. % (29.5 масс. %)	-	3	-	~930	1.45	-	170
		Монодисперсные сферические частицы 1.41 ± 0.20 μм						~660	1.50		110
		Монодисперсные сферические частицы 0.72 ± 0.15 μм						~460	1.40		35
ПАНИ [73]	Силиконовое масло (диметилсилоксан, KF-96) 50 сСт	Агрегаты частиц неправильной формы размером 0.5-1 μм	1.3	10 об. % (11.6 масс. %)	2.20	3	-	~235	-	-	340
		Нанофибриллы диаметром 150-200 нм и длиной 1-3 μм			2.21			~1300			370
		Нанопластины толщиной 80-100 нм длиной 1-3 μм (оскид графена использовали в качестве матрицы-шаблона)			2.06			~890			730

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя		ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см^2	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон $\log(\tau_0) = f(\log(E))$	R, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
ПАНИ-НЕС [74]	Силиконовое масло (полидиметилсилоксан)	Нанофибриллы 100 нм в ширину и 500 нм в длину (с небольшим содержанием воды)		-	15 масс. %	-	2.8	-	599*	-	-	14000
		Нанофибриллы 100 нм в ширину и 500 нм в длину (высушенные)					3.2		824*			17000
		Сферические частицы диаметром 80 нм			10 масс. %		3.0		120			4000
$BaTiO(C_2O_4)_2/NH_2CONH_2$ [75]	Силиконовое масло	Сферические частицы диаметром 50-70 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки 3-10 нм	Содержание волокон (хлопок): 0 об. %	-	5 масс. %	-	2	~2.3	6700*	-	~90	$45*10^4$
			0.2 об. %					~6.2	~11700*			$58*10^4$
			0.4 об. %					~7.6	~13000*			$32*10^4$
			0.8 об. %					~11.3	16000*			$40*10^4$
FeC_2O_4/TiO_2 [75]		Частицы близкие к сферическим размером несколько μм с нерегулярной поверхностью из наночастиц TiO_2	0 об. %					~0.35	400*			1900
			0.2 об. %					~0.45	~450*			1800
			0.4 об. %					~0.67	~500*			1700
			0.8 об. %					~1.0	550*			1600

Материал		Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя		ρ, г/см³	Концентрация	Δε$_ж$, отн. ед.	E_{max}, кВ/мм	J_{max}, μA/см²	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Наклон log(τ_0) = f(log(E))	R, %	$K_{эфф.}$, отн. ед.**
Природная слюда [76]		Силиконовое масло 100 сСт	Частицы пластинчатой морфологии	5.5 μм	-	30 масс. %	-	3	-	30.5	-	-	11
Синтетическая слюда [76]				5.0 μм						516.2			200
Стекло [76]				5.2 μм						134.2			52
Слюда покрытая TiO_2 [77]	Толщина слоя TiO_2 (цвет): 93 нм (желтый)	Силиконовое масло 100 сСт	Частицы пластинчатой морфологии размерами ~10-25 μм, толщиной ~1 μм с различной толщиной оболочки TiO_2 и красителя	Краситель: -	-	3 масс. %	-	3	-	42.1	1.5	-	2400
				тетразин						118.2			7200
	108 нм (красный)			-						54.4			3500
				кармин						62.1			4300
	131 нм (фиолетовый)			-						66.8			5000
				ферроцианид железа/ кармин						84.0			7000
	157 нм (голубой)			-						73.2			6600
				ферроцианид железа						103.5			11000

где ρ – плотность наполнителя, Δε$_ж$ – сила диэлектрической релаксации жидкости (Δε = $\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$; где ε_0 и ε_∞ диэлектрическая проницаемость в низко- и высокочастотном пределе, соответственно), E_{max} – наибольшая эксплуатационная напряженность электрического поля, не приводящая к пробою, 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.

**$K_{эфф.}$ – относительная эффективность, рассчитанная как $\boldsymbol{K_{эфф.}} = (\boldsymbol{\tau_E} - \boldsymbol{\tau_0})/(\boldsymbol{\tau_0 E}_{отн.}\boldsymbol{\omega})$, где $\boldsymbol{\tau_E}$ (Па) – предел текучести под действием электрического поля 3 кВ/мм или при E_{max}, $\boldsymbol{\tau_0}$ (Па) предел текучести вне электрического поля, $\boldsymbol{E}_{отн.}$ (отн. ед.) – нормированная напряженность электрического поля (на 1 кВ/мм), $\boldsymbol{\omega}$ (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 $\boldsymbol{\tau_0}$ 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.).

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

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_{ж}$, отн. ед.	$M_ч$, эму/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_3O_4/PIn [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_3O_4/ПАНИ [88]	Силиконовое масло (KF-96) 50 мПа*с	Сферические частицы со структурой ядро-оболочка размером ~1 μм с шероховатой поверхностью, толщина оболочки ПАНИ несколько десятков нм, соотношение Fe_3O_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_3O_4/PPy [89]	Силиконовое масло 100 сСт	Сферические частицы со структурой ядро-оболочка размером ~580 нм с шероховатой поверхностью, толщина оболочки PPy 60 нм, содержание Fe_3O_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_3O_4 [83]	Силиконовое	Сферические частицы диаметром 350 нм с шероховатой поверхностью из	1.49	10 об. % (14.7	-	42.04	2.5	171	~128*	~25	2.0	1.0	-	3500	17

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	$M_ч$, эму/г	E_{max}, кВ/мм	H_{max}, kA/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Предел текучести при 100 kA/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)**
	масло 100 сСт	наночастиц Fe_3O_4 (содержание 32 масс. %)		масс. %)											
$MnFe_2O_4$ /ПАНИ [84]	Силиконовое масло (KF-96) 100 сСт	Сферические частицы диаметром 450 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки ПАНИ 25 нм, соотношение $MnFe_2O_4$/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
$ZnFe_2O_4$/ ПАНИ [80]	Силиконовое масло (KF-96) 100 сСт	Сферические частицы диаметром 400 нм со структурой ядро-оболочка, толщина оболочки ПАНИ 30 нм, соотношение $ZnFe_2O_4$/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
$ZnFe_2O_4$/ 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-	2.1	5 об. % (10.2 масс. %)	-	39.93	3.5	171	~48.3	~26.6	1.5	1.5	-	1600	26

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя		ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	$M_ч$, эму/г	E_{max}, кВ/мм	H_{max}, kA/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Предел текучести при 100 kA/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)**
		40 нм, соотношение $ZnFe_2O_4$/PNMA составляет 60.5/39.5 масс. %														
ПАНИ/ $ZnFe_2O_4$ [91]	Силиконовое масло 100 сСт	Малиноподобные частицы со структурой ядро-оболочка размером ~2 μм, оболочка наночастиц $ZnFe_2O_4$ 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
Оксид графена/ Gd_2O_3 [85]	Силиконовое масло (полидиметилсилоксан) 100 сСт	Пластины оксида графена размером до нескольких μм и толщиной 0.98 ± 0.13 нм, покрытые наночастицами 2.09 ± 0.25 нм	Соотношение Gd_2O_3/оксид графена по массе: 1:1	-	0.6 масс. %	2.93	0.40	4	343	50	1416	-	-	95	1100	520
			1:2			6.85	0.26			140	1375				720	90
			1:3			18.4	0.14			180	1288				4900	210
Оксид графена/ Fe_3O_4 [90]	Силиконовое масло 100 сСт	Пластины оксида графена размером до нескольких сотен нм, покрытые наночастицами 10 нм, соотношение оксид графена/Fe_3O_4 по массе составляет: 5/1		-	15 масс. %	-	52.2	2.5	-	~91*	-	1.5	-	-	2400	-
					20 об. %			-	222	-	~150	-	2.0 (<171 кА) 1.5		-	1

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	$M_ч$, эму/г	E_{max}, кВ/мм	H_{max}, kA/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Предел текучести при 100 kA/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)**
												(>171 кА)			
Оксид графена/ Fe_3O_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. %)	-	16.1	3	796	12	6.71#	-	-	82	90	0.5#
				70 об. % (85.5 масс. %)			-		-	114#		1.5	-	-	0.09#
ПС/оксид графена/ Fe_3O_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_3O_4 размером 10 нм	1.81	5 об. % (9.0 масс. %)	-	22.4	3	-	~15	-	1.5	-	-	550	-
				10 об. % (17.3 масс. %)			-	171	-	~127	-	1.5		-	13
SiO_2/TiO_2 @Fe_3O_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.	-	20 об. %	1.27	36.5	3	796	~9	~16#	-	-	69	150	5#

Материал	Тип дисперсионной среды и её вязкость	Морфология наполнителя	ρ, г/см^3	Концентрация	$\Delta\varepsilon_ж$, отн. ед.	$M_ч$, эму/г	E_{max}, кВ/мм	H_{max}, kА/м	Предел текучести при 3 кВ/мм или при E_{max}, Па	Предел текучести при 100 kА/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)**
		оболочка толщиной 30 нм состоит из слоя SiO_2 с включениями наночастиц Fe_3O_4													

где ρ – плотность наполнителя, $\Delta\varepsilon_ж$ – сила диэлектрической релаксации жидкости ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$; где ε_0 и ε_∞ диэлектрическая проницаемость в низко- и высокочастотном пределе, соответственно), $M_ч$ – намагниченность частиц наполнителя, E_{max} – наибольшая эксплуатационная напряженность электрического поля, не приводящая к пробою, 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 П1.

***** значения указаны при максимальной напряженности электрического поля.

**$K_{эфф.}$ (H) – относительная эффективность, рассчитанная как $\boldsymbol{K_{эфф.}} = (\boldsymbol{\tau_H} - \boldsymbol{\tau_0})/(\boldsymbol{\tau_0}\mathbf{H}_{отн.}\boldsymbol{\omega})$, где $\boldsymbol{\tau_H}$ (Па) – предел текучести под действием магнитного поля 100 кА/м или при H_{max}, $\boldsymbol{\tau_0}$ (Па) предел текучести вне магнитного поля, $\mathbf{H}_{отн.}$ (отн. ед.) – нормированная напряженность магнитного поля (на 1 кА/м), $\boldsymbol{\omega}$ (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 $\boldsymbol{\tau_0}$ 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.).

33