

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА (обзор)\*

© О. П. Паренаго\*, А. С. Лядов\*\*, А. Л. Максимов

Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН,  
119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский пр., д. 29  
E-mail: \*parenago@ips.ac.ru, \*\*lyadov@ips.ac.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.  
После доработки 19 июля 2022 г.  
Принята к публикации 19 июля 2022 г.

*В обзоре обсуждаются вопросы, связанные с созданием смазочных материалов с учетом требований, которые предъявляются при эксплуатации современного электротранспорта, обусловленные конструктивными особенностями как самих транспортных средств, так и отдельных их узлов. Проведен анализ научной и технической литературы, посвященной созданию и использованию смазочных материалов для электротранспорта, показано, какие базовые масла и функциональные присадки наиболее часто используются и в чем их преимущества и недостатки. Также обсуждены некоторые вопросы дальнейшего развития фундаментальных и прикладных аспектов современного смазочного материаловедения применительно к электротранспорту.*

Ключевые слова: смазочные материалы; масла; пластичные смазки; электротранспорт  
DOI: 10.31857/S0044461822060019; EDN: DJOVRY

### Введение

Хорошо известно, что автомобили являются наиболее распространенным видом транспортных средств. Их общее число на нашей планете, по оценкам аналитической компании WardsAuto (США), в 2019 г. составляло около 1.4 миллиарда, при этом мировой уровень автомобилизации равнялся 182 автомобилям на 1000 человек, а среди зарегистрированных единиц этой техники 95% занимают легковые автомобили. К странам с наибольшим абсолютным числом машин относятся США, Китай, Германия, Англия, Франция. Россия по числу автомобилей на 1000 человек занимает 48 место.

Одним из главных недостатков автотранспорта на основе двигателей внутреннего сгорания или дизель-

ного двигателя является существенное негативное воздействие на окружающую среду. По различным оценкам, загрязнение атмосферы от автомобилей составляет 40–50%. Один легковой автомобиль ежегодно поглощает в среднем более 4 т кислорода, выбрасывая одновременно с отработанными газами около 800 кг оксидов углерода, 40 кг оксидов азота и почти 200 кг различных углеводородов [1]. Кроме того, значительное количество отработанных горюче-смазочных материалов зачастую попадает в водные объекты и на почву. Следует также добавить увеличение количества взвешенных частиц различного размера и состава, образующихся при изнашивании автомобильных покрышек и асфальтового покрытия, особенно при использовании шипованных шин [2]. Еще одним важным фактором, оказывающим отрицательное

\* Научное редактирование проведено научным редактором журнала «Нефтехимия» к.х.н. Н. В. Шелеминой.

воздействие на людей, является шумовое загрязнение, возникающее при эксплуатации транспорта [3]. Немаловажное значение имеет наблюдаемое во всем мире подорожание углеводородных топлив, что связано с истощением природных ресурсов для нефтегазовой переработки этих видов сырья.

Таким образом, неизбежным становится переход на другие, более безопасные виды транспортных средств, среди которых одним из основных являются электромобили и варианты на их основе. Впервые электромобили появились в XIX веке после открытия М. Фарадеем явления электромагнитной индукции. Официальную дату создания первого электрокара считают 1837 г., когда шотландский изобретатель Роберт Дэвидсон представил миру свой электромобиль, в котором могли ехать 2 человека [4]. Это изобретение получило в мире довольно быстрое развитие. Так, например, уже в 1910 г. в Нью-Йорке парк такси насчитывал несколько десятков тысяч электромобилей, несмотря на то что емкость батарей была очень небольшой, а число пунктов их зарядки ограничено. К тому же скорость электрокаров составляла около  $20 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$ , а пробег без подзарядки — немногим более 100 км.

В дальнейшем, в XX веке благодаря бурному развитию процессов добычи нефти и ее переработки первенство получили двигатели внутреннего сгорания (ДВС) во многом благодаря американскому предпринимателю Г. Форду. Быстрому прогрессу в развитии автомобильного транспорта с ДВС способствовали открытие в мире огромного количества нефтяных месторождений и крупные успехи в создании высокоэффективных технологий переработки нефти, а также экономические и социально-политические причины (конкуренция, войны и т. п.). Губительное влияние автомобилей на экологическую ситуацию привлекло внимание людей лишь в последней четверти прошлого века. К тому же это время совпало с подорожанием нефти и нефтепродуктов ввиду сокращения ее запасов и ухудшением качества. Все эти причины побудили передовые страны вновь обратиться к более безопасным транспортным средствам, к которым относятся электромобили и варианты на их основе, автомобили с водородным двигателем, транспорт на солнечных батареях и др. [5]. Одним из вариантов электромобиля являются так называемые гибридные авто, где начало движения и разгон до скорости около  $50 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$  обеспечивается электродвигателем, а затем включается двигатель внутреннего сгорания.

Настоящий обзор посвящен рассмотрению вопросов, связанных с созданием современных смазочных материалов, которые позволяют обеспечивать надеж-

ную и безопасную эксплуатацию электротранспорта с учетом их конструктивных особенностей.

### Конструкционные узлы электромобилей

К основным компонентам в составе электромобилей относятся: электрический силовой агрегат, аккумуляторная батарея, упрощенная трансмиссия (ступенчатая либо бесступенчатая), тяговый инвертор, интегрированное зарядное устройство, электронный контроллер управления компонентами системы.

Главным агрегатом любого электрического транспортного средства является электромотор, в котором за счет электромагнитной индукции вращающийся вал обеспечивает движение транспортного средства. При этом электродвигатели могут иметь различные конструкционные особенности, принципы питания и управления: постоянного и переменного тока, синхронные и асинхронные, щеточные или коллекторные. Вне зависимости от типа двигателя электротяга имеет следующие неоспоримые преимущества перед ДВС: коэффициент полезного действия (кпд) составляет 90–95% по сравнению с ДВС (22–60%); максимальный крутящий момент достигается на любых оборотах двигателя; простота конструкции не требует принудительного водяного охлаждения; возможность работы в режиме рекуперации энергии торможения (генератора); отсутствие выхлопных газов и шума; меньшая стоимость и простота обслуживания.

Аккумуляторная батарея является самым дорогим узлом, ее стоимость, по данным [6], составляет свыше 45% стоимости электромобиля. Батареи различаются по емкости (15–200 кВт), рабочему напряжению (от 350 до 700 В), материалу ячеек и по форме. В качестве материала ячеек наиболее широкое распространение получил литий-ионный тип, однако в настоящее время ведутся интенсивные работы по внедрению литий-полимерных батарей и суперконденсаторов. Зарядное устройство на борту электромобиля имеет возможность осуществлять заряд аккумуляторной батареи от любого источника тока, начиная от обычной электрической розетки и до специальных сверхмощных терминалов, причем зарядка может осуществляться переменным или более мощным постоянным током. В электромобилях отсутствует необходимость в применении традиционной коробки передач, как в ДВС или дизельных двигателях. Вместо нее обычно используют одноступенчатый редуктор, позволяющий трансформировать высокую скорость вращения вала двигателя в более низкую для передачи на ведущие колеса. Тяговый инвертор преобразует постоянный ток батареи в переменный

для подачи на электромотор. Кроме этой функции инвертор в ходе эксплуатации управляет ускорением или замедлением транспортного средства, регулируя потоки энергии от батареи к двигателю и обратно в случае рекуперации на торможение. Электронный контроллер, т. е. электронная система управления электромобиля, призван обеспечивать безопасность водителя и пассажиров, создавать комфорт при движении и управлении им. В целом контроллер преобразует высокое напряжение, идущее от аккумуляторной батареи, в напряжение, необходимое в данный момент времени. Более конкретно, он регулирует крутящий момент, обеспечивает оптимальный расход заряда батареи, управляет рекуперацией торможения и заряжает дополнительную 12-вольтовую батарею бортовой сети для функционирования светотехники, электроусилителей, компрессоров и др.

#### **Особенности смазочных материалов для электромобилей**

В целом электромобили требуют на 50–70% меньше смазочных материалов по сравнению с ДВС, в частности, они совершенно не нуждаются в моторных маслах, но по-прежнему им требуется трансмиссионное масло и пластичные смазки. Однако в отличие от смазочных масел для двигателей на нефтяном топливе в электромобиле эти материалы должны обладать определенными свойствами, поскольку в ходе эксплуатации они контактируют с медными проводами, датчиками, электрическими модулями и цепями и тем самым подвержены действию электромагнитных полей.

Полагают, что масла для электродвигателей должны обладать тремя основными свойствами [7]. Во-первых, трансмиссионные масла должны обеспечивать высокую антикоррозионную активность при контакте с медными проводами, что может быть достигнуто введением активных присадок. Кроме того, необходима также их совместимость с полимерными материалами, используемыми в электрических и электронных компонентах (датчики, смолы, контакты). Во-вторых, масла должны иметь определенную электрическую проводимость, поскольку известно, что, например, слишком низкая проводимость жидких сред может приводить к накоплению электрических зарядов и появлению искр. Напротив, при слишком высокой проводимости может возникать опасная утечка тока. Третье важное свойство трансмиссионных масел связано с очень высокими скоростями вращения вала электродвигателя (до 20 000 об·мин<sup>-1</sup>), что требует применения масел с весьма низкой вязко-

стью. Еще одно специальное требование к смазочным материалам для электродвигателей заключается в обеспечении более низкого уровня шума.

В электромобилях для снижения трения роликовых подшипников качения и шестерней в 80–90% случаев используются пластичные смазки [8]. Известно, что в элементах подшипников качения эти смазки образуют очень тонкие пленки размером порядка десятых долей нанометра [9]. При этом основным недостатком пластичных смазок является ограниченный срок их смазочного действия, что затрудняет прогнозирование эффективного совместного функционирования всего узла трения — механического элемента и смазочного материала. Поскольку механизм действия пластичных смазок намного более сложен по сравнению с жидкими маслами, одной из главных задач современного смазочного материаловедения является установление фундаментальных основ снижения трения в случае смазок. Кроме того, актуально создание новых видов смазок, способных функционировать в более жестких условиях эксплуатации смазки (экстремально низкие или высокие температуры, а также скорости сдвига) [10]. Значительная роль в электромобилях отводится смазочно-охлаждающим композициям, поскольку непрерывная работа батарей приводит к их сильному нагреванию, а, как известно, для литий-ионных батарей их производительность заметно снижается, если температура повышается выше 45°C или снижается ниже 5°C [11].

#### **Современное состояние разработок в области смазочных материалов для электротранспорта**

Как уже отмечалось, конец прошлого века ознаменовался резким усилением интереса к производству электромобилей и их широкому использованию в качестве основных транспортных средств. Уже в 1996 г. в США был выпущен первый серийный электромобиль серии GM EV1.

При производстве первых электромобилей были использованы все достижения в совершенствовании смазочных масел, пластичных смазок и присадок, известные на тот момент времени для двигателей на углеводородных топливах, в особенности если учесть, что значительная доля электромобилей включала гибридные двигатели. Впоследствии, в начале XXI века, начали появляться работы, в основном патенты, в которых предлагались новые типы смазочных материалов и их характеристики с учетом специфики электродвигателя. Например, в 2014 г. опубликован аналитический обзор, где были приве-

дены результаты подробного тестирования (состояние деталей двигателя и смазочных материалов, экономичность, экологические показатели и т. п.) двух японских гибридных автомобилей (Toyota Prius и Toyota Camry Hybrid) с пробегом 200–400 тыс. км [12]. На этом основании были сформулированы требования к смазочным маслам и смазкам для гибридных автомобилей.

Смазочные материалы для электромобилей, как и их аналоги для двигателей внутреннего сгорания, должны минимизировать трение, повышая долговечность и эффективность работы двигателя. При этом большее внимание должно быть уделено электрическим свойствам смазочных материалов (напряжение обрыва, проводимость и др.) в сочетании с трибологическими характеристиками при высоких оборотах, коррозионной стойкостью и показателями терморегулирования.

### Базовые масла

Основой всех смазочных материалов являются базовые масла, которые за более чем полувековую историю развития ДВС прошли долгий путь эволюции, начиная от высоковязких остаточных нефтяных масел и заканчивая высокоочищенными минеральными маслами, подвергшимися глубокому химическому превращению, или синтетическими маслами. При создании смазочных композиций для электромобилей обычно используют синтетические базовые масла (полиальфаолефиновые масла, полиалкиленгликоли, сложные эфиры различного состава). Так, в патенте компании Total (Франция) [13] описана композиция, где в качестве базового масла использовали полиалкиленгликоль, и которая предложена для охлаждения и смазки движущихся частей электромобилей. Помимо высоких охлаждающих свойств композиция стабильна к окислению, предотвращает коррозию и относится к экологически чистым и безопасным материалам. Этой же компанией запатентована композиция, где одной из составных частей базового масла является сложный диэфир с формулой  $R^a-C(O)-O-[(C(R)_2)N-O]S-C(O)-R^b$ , где  $R$ ,  $R^a$  и  $R^b$  — углеводородные радикалы [14]. Композиция предназначена для электромобилей и гибридных авто для смазки и охлаждения трансмиссии и батареи.

Сложные эфиры в составе базовых масел также использованы в патенте компании Exxon Mobil (США) [15], базовый компонент которого содержит один сложный эфир, полученный частичной этерификацией многоатомного спирта, и второй сложный эфир, полученный полной этерификацией многоатомного спирта. Смазочное масло имеет кинематическую

вязкость в пределах 1–5 сСт при 100°C, а температуру вспышки — от 125 до 225°C. Эти два эфира берутся в таком соотношении, что, если температура вспышки увеличивается, кинематическая вязкость либо сохраняется, либо уменьшается.

Компания Total предложила для охлаждения и смазки биоразлагаемую жидкость, включающую более 95 мас% *изо*-парафинов, менее 3 мас% нафтенных и менее 100 ppm ароматических углеводородов [16]. При этом биоразлагаемость равна 80–83% (по методу OECD), температура вспышки 115–149°C, вязкость — 2.5–3.8 сСт при 40°C.

Известны также патенты компании Exxon Mobil [17–19], в которых для улучшения ряда основных свойств базовых масел предложены жидкие кристаллы. Например, в патенте [18] базовое масло включает жидкие кристаллы с формулой  $A-(R1)_n$ , где  $A$  — монокольцо или поликольцевая ароматическая группа,  $R1$  — углеводородная, алкокси- или алкилтиогруппа,  $n = 1-12$ . Кинематическая вязкость базового масла равна 2–200 сСт при 40°C. Композиция позволяет снижать трение и контролировать износ в двигателях электрических и гибридных транспортных средств. В патенте [19] базовый компонент содержит жидкие кристаллы, имеющие общую формулу  $R_1-(A)_m-Y-(B)_n-R_2$ , где  $R_1$  и  $R_2$  — алкильная или алкоксигруппа,  $A$  и  $B$  — циклоалифатическая или ароматическая группа,  $Y$  — группы:  $-CH_2-CH_2-$ ;  $-CH=CH-$ ;  $-OCOO-$ ;  $-CSO-$ ;  $-O-$ ;  $-S-$ ;  $-SO_2-$ ;  $-NO-$ ;  $-ONO_2-$  и т. п.,  $m$  и  $n = 0, 1-3$ . Кинематическая вязкость базового масла 2–28 сСт при 40°C. Базовый компонент улучшает вязкостно-температурные свойства и индекс вязкости смазочного масла.

Как уже отмечалось, одними из главных свойств смазочных масел для электромобилей являются их электропроводность и диэлектрическая постоянная. В отношении этих свойств одним из лидеров также является компания Exxon Mobil, заявившая в 2018 г. серию из пяти патентов [20–24]. В этих патентах основным компонентом (80 мас%) является базовое масло, в качестве второстепенных компонентов (до 5 мас%) используется пакет присадок (нейтральные детергенты, противоизносная присадка — диалкилдитиофосфат цинка, модификатор трения — диалкилдитиокарбамат молибдена, модификаторы вязкости и др.), а также агенты проводимости. В результате введения агентов проводимости смазочное масло имеет электропроводность в пределах 10–20 000 пСм·м<sup>-1</sup>, диэлектрическую проницаемость от 1.6 до 3.6 (для сравнения типичный диэлектрик — стекло имеет электропроводность 0.001–10 пСм·м<sup>-1</sup>).

Кинематическая вязкость этих масел равна 2–20 сСт при 100°C. При этом в варианте патента с высокой проводимостью [23] электропроводность имеет величину 3000–20 000 пСм·м<sup>-1</sup>, а в варианте с низкой проводимостью [24] электропроводность составляет 50–3000 пСм·м<sup>-1</sup>.

Следует отметить еще несколько патентов, имеющих непосредственное отношение к улучшению основных свойств смазочных масел. Согласно одному из них (компания VALVOLINE, США) [25], в базовое масло с присадками дополнительно вводится аминный комплекс молибдена (диизотридециламин молибдат), позволяющий повысить защиту электродвигателя при приложении напряжения на электрод и поддерживать градиент электрического сопротивления. Кроме того, на поверхности медных проводов образуется защитная пленка.

Патент компании Afton Chemical Corporation (США) [26] относится к смазке трансмиссии электромобиля или гибридного авто с использованием базового масла на основе разветвленного сложного эфира (с добавлением системы растворителей) и сополимерами поли(мет)акрилата. Композиция имеет хорошие смазочные и электрические свойства в сочетании с эффективностью охлаждения.

Патент компании Idemitsu Kosan Co (Япония) [27] относится к смазочному маслу для бесступенчатой трансмиссии. Композиция содержит смесь синтетических масел на основе нафтенов (А) и сложного моноэфира с добавлением лонгифолена (С) — высококипящей фракции сосновых смол (смесь сесквитерпенов). Композиция имеет превосходную низкотемпературную текучесть и высокую температуру вспышки (140°C).

В патенте компании Shell Int. Research (Нидерланды) [28] для охлаждения и электрической изоляции батареи в электромобилях и гибридных автотранспортных средствах предложена композиция, содержащая в качестве базового масла полиальфаолефины в смеси с минеральными или растительными маслами и включающая антиоксиданты аминного или фенольного типа. Композиция имеет удельную теплоемкость не менее 2.06 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> и кинематическую вязкость при не более 20 мм<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> при 40°C.

### Присадки

В химии присадок к смазочным материалам в настоящее время наметилась устойчивая тенденция к применению наноразмерных частиц неорганической природы для снижения трения и износа трущихся металлических поверхностей. Эти исследования суммированы в обзорах последних лет [29, 30]. Было по-

казано, что наноприсадки также оказывают влияние на другие процессы, протекающие на поверхности в ходе граничного трения (окисление, коррозия и т. п.). В недавно опубликованном обзоре рассматриваются потенциальные возможности использования нанолубрикантов для электродвигателей [31].

Одним из главных свойств смазочных материалов в электродвигателях является повышение эффективности передачи крутящего момента за счет уменьшения трения в трансмиссии, приводящей к снижению потребления энергии у силовых установок. В последние годы в ряде исследований была показана высокая антифрикционная активность неорганических частиц, в частности оксидов кремния, цинка, титана, меди и т. п. В работе [32] в пластичные смазки вводили 0.3 мас% диоксида кремния, что приводило к значительному уменьшению коэффициента трения. Эти же авторы сообщили о присадке к пластичной смазке (ZnO—Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), снижающей трение, вибрацию и температуру высокоскоростных подшипников (55 тыс. об·мин<sup>-1</sup>) [33]. Помимо этих свойств существенная роль принадлежит углеродным наноразмерным присадкам, повышающим несущую способность пар трения при экстремально высоких давлениях. Так, введение в смазку на основе лития всего 1 мас% углеродных нанотрубок (УНТ 50) приводило к возрастанию несущей способности на 52% [34]. Использование в той же смазке 1 мас% многослойного графена имело следствием значительное улучшение противозадирных свойств; нагрузка схватывания возрастала на 75% [35]. Следует отметить также проявление синергизма трибологических свойств композиций присадок [36, 37]. Например, наночастицы Ag и Pd, модифицированные додекантиолом, при одновременном действии (0.1–1 мас%) в составе смазочного масла уменьшают свои размеры (от 20–30 до 2–6 нм), форму, электронную структуру и снижают трение и износ на 30 и 80% соответственно [38].

Другое важное свойство наноразмерных присадок относится к обеспечению стабильной работы электромеханической системы — к предотвращению возникновения коронных разрядов и искр вследствие возникновения напряжения между валом и корпусом подшипника [31]. Известно, например, что для неполярных минеральных смазочных сред при действии электротока происходит быстрое образование свободных радикалов и гидропероксидов, приводящих в присутствии кислорода воздуха к окислению масла и отложению продуктов на стенках двигателя [39–41]. Общие проблемы, возникающие в смазочных материалах под действием электрического тока, рассмотрены в недавно опубликованных обзорах [42, 43].

Для снижения точечной коррозии вращающихся подшипников под действием напряжения в пластичные смазки на основе полиальфаолефиновых масел или сложных эфиров вводят углеродные добавки (технический углерод или углеродные нанотрубки) [44]. Было показано, что при пропускании через смазки электрического тока их объемное удельное сопротивление в присутствии добавок снижалось на два-три порядка, препятствуя износу подшипников.

В работе [45] показано, что при введении в смазку на основе нефтяного масла олеофильных нано- $\text{TiO}_2$  или нано- $\text{SiO}_2$  в количестве 0.1 мас% ее прочность на пробой переменным током увеличивается на 10.4 и 8.2% соответственно. Эти же присадки повышают объемное сопротивление смазки на основе нефтяного масла на 23 и 30% соответственно.

В другом исследовании в режиме сухого трения изучено влияние композитов  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  (1.0 об%) с различной величиной частиц оксида алюминия на электрический износ при скольжении [46]. Результаты показывают, что с увеличением размера частиц композитов электрическая проводимость уменьшается. Самые высокие свойства износостойкости находятся в диапазоне 50–100 нм для наночастиц  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , что соответствует относительно высокой электропроводности и высокой твердости.

В работе [47] предложены смазки на водно-спиртовой основе, состоящие из глицерола (75%) и воды (25%), которые включают 4.5 мас% многостенных углеродных нанотрубок, модифицированных ОН-группами. Измеренное удельное сопротивление в этом случае аномально низкое ( $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}^{-1}$ ), и такая высокая электропроводность, по мнению авторов, может быть связана с образованием в смазке водородных связей, повышающих ее эффективность.

Относительно проблем вязкости смазочных материалов для электромобилей следует учесть, что использование масел с низкой вязкостью ввиду высоких оборотов вала электродвигателя приводит к образованию очень тонких масляных пленок на поверхности металла, приводящих к значительному снижению несущей способности масла и износу конструктивных материалов [48, 49]. Кроме того, уменьшенная толщина пленки повышает рабочую температуру масла из-за более частого контакта поверхностей в условиях граничного трения, а также снижает срок работы подшипников [50]. Эти обстоятельства требуют для масел с низкой вязкостью применения присадок с высокой противоизносной, антифрикционной и противозадирной активностью.

Обычно базовые масла имеют диапазон вязкости 20–500 сСт при 40°C. Однако для повышенных

температур и высокой скорости сдвига при использовании наноразмерных присадок в качестве порога вязкости было выбрано значение 100 сСт при 40°C [31]. Этим условиям хорошо удовлетворяют синтетические трансмиссионные масла на основе полиальфаолефиновых масел, которые имеют превосходный диапазон рабочих температур благодаря высокому индексу вязкости, хорошую стойкость к окислению, устойчивость к сдвигу и антикоррозионные свойства. В работе [51] в базовое полиальфаолефиновое масло вводили нанотрубки  $\text{MoS}_2$ , в результате чего коэффициент трения снижался более чем в 2 раза, а износ — в 5–9 раз. Трибологическая активность полиальфаолефинового масла ПАОМ-6 существенно возрастала при добавлении в него 0.5 мас% наночастиц никеля (20 нм) [52]; эффективность коэффициента трения при этом повышалась с 7 до 30%, а износа — с 5 до 45%. Авторы [53] показали, что введение в масло на основе ПАО суспензий наночастиц оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  или их смеси в количестве 0.25 мас% кроме снижения коэффициента трения на 40–50% и износа на 25–30% приводит еще и к повышению индекса вязкости на 2%. Такое снижение кинематической вязкости масла объясняется присутствием наночастиц между слоями смазочного масла, облегчающим их относительное перемещение. Однако следует учитывать такой фактор, как взаимодействие наночастиц с высокополярными группами базовых масел на основе сложных эфиров [54]. Оказалось, что полярная природа этих базовых компонентов коррелирует с отрицательным воздействием наночастиц на процесс смазки, которое связано с тем фактом, что полярные молекулы взаимодействуют с металлическими частицами, покрывая их масляной пленкой, которая препятствует их роли в процессах трения [55, 56]. Для минимизации такого взаимодействия поверхность наночастиц необходимо покрывать неполярными соединениями.

Очень важным свойством смазочных материалов для электромобилей является их термоокислительная стабильность, поскольку высокие обороты вала электродвигателя, повышенные температуры и электрически заряженная среда ускоряют процесс окисления масла. Кроме того, следует учитывать, что смазочные материалы с низкой вязкостью образуют весьма тонкие слои на поверхности металла, которые окисляются с большей скоростью. Еще одним фактором, ускоряющим эти процессы, является наличие в структуре двигателей таких компонентов, как железо и медь, катализирующих реакции окисления [57]. Полагают, что помимо традиционных антиоксидантов в смазочные масла для электродвигателей следует

вводить электропроводящие наноприсадки, реагирующие с кислородом перед его взаимодействием со смазочными материалами [9].

В связи с этим можно указать на работу [58], в которой изучали окисление керосина при добавлении в него поверхностно-модифицированных медных наночастиц. Измерения показали, что в результате их введения вязкость и термическая проводимость заметно увеличились, а концентрация гидропероксидов значительно снизилась. В другом исследовании [59] термогравиметрическим методом было показано, что минеральное масло, содержащее в качестве антиоксиданта листы графена толщиной 8, 12 и 60 нм, имеет более высокую термическую устойчивость, поскольку начальная температура его окисления сдвигается на 13–17°C. В работе [60] был исследован эффект синергизма при использовании трибологически активной присадки (модифицированный сульфонатом нанокarbonат кальция, 35 нм) и беззольного антиоксиданта (N-фенил- $\alpha$ -нафтиламин), вводимых в количестве 2 мас% в состав гидрированного растительного масла. Наряду с улучшением противоизносных и противозадирных свойств смесь присадок позволила существенно увеличить период индукции при окислении масла. Иной тип защиты смазочных материалов от окисления продемонстрирован в работе [61], где кроме антиокислителя — диалкилдитиофосфата цинка — в смазочное масло вводили цеолит. Методами ИК- и ЯМР-спектроскопии авторы показали, что цеолит защищает соединение цинка даже при нагревании до 150°C, уменьшая степень окисления и адсорбируя продукты окисления (альдегиды, кетоны и кислоты). Однако роль наночастиц во взаимодействии со свободными радикалами пока еще остается не вполне ясной и требует дополнительных исследований [31].

При разработке смазочных материалов для электромобилей особое внимание уделяется коррозионной защите медных компонентов двигателя, поскольку такие свойства, как пластичность, надежность, а самое главное, электропроводность, делают медь незаменимым, поистине жизненно важным элементом. Основное решение при использовании металлов в агрессивных средах основано на пассивации металлооксидных слоев на поверхности. Так, в работе [62] было изучено влияние суспензии наночастиц кремнезема (10 нм) на коррозию меди. При этом методами кварцевых микровесов и атомно-силовой микроскопии показано, что при покрытии частицами только 10% поверхности скорость коррозии уменьшается в 4 раза. Авторы [63] отмечают защиту от коррозии и окисления при введении в смазочное масло 2D-материала — графена, причем окисленный

графен такими свойствами не обладает. Сообщается также, что соединения бора, например нанопорошки борной кислоты (20 нм), введенные в растительные масла, например в масло канолола (генетически модифицированный рапс), значительным образом повышают термоокислительную стабильность и снижают коррозию металлов [64, 65].

В заключительной части этого раздела следует рассмотреть возможность использования наночастиц в гидролубликантах, в частности, в воде. Вода представляет собой альтернативный и перспективный смазочный материал, поскольку она является доступной, негорючей и нетоксичной. Однако она имеет множество недостатков: низкая вязкость, испаряемость, высокая температура замерзания, коррозионная активность и высокая электропроводность. Тем не менее введение в воду не менее 5 мас% добавок может придать ей преимущества перед традиционными маслами и смазками, в первую очередь в теплопроводности и низкой цене [66].

В ряде работ [67–69] в качестве присадок в воду вводили дисперсии различных углеродных наноматериалов. При трибологических испытаниях однослойных листов оксида графена с их содержанием в воде 0.06 мас% совершенно исчезали шум и вибрация, а коэффициент трения и износ уменьшались на 44 и 17% соответственно [67]. В этой же работе было показано, что оксид графена позволяет повысить рН воды с 3.1 до 9.7. Аналогично этим результатам при таком же количестве в воде (0.06 мас%) смесь наноразмерных оксида графена и нитрида графитового углерода приводила к снижению коэффициента трения и радиуса пятна износа на 26–37 и 16–19% соответственно [68].

В работе [70] в воду вводили 0.8 мас% наночастиц CuS, модифицированных диалкилдитиокарбаминовой кислотой для улучшения их растворимости. Изучение свойств этой системы показало, что коэффициент трения и скорость износа снижаются на 78 и 93% соответственно, а коэффициент теплопроводности возрастает на 3%. Методами электронной микроскопии и XPS-анализа установлено, что на поверхности металла в результате трения образуется комплексная смазочная пленка, включающая медь и сульфид железа.

Большой интерес вызывает использование нанокристаллитов целлюлозы (НКЦ) в качестве добавок в смазочные материалы на водной основе [71]. Введение 2 мас% НКЦ обеспечивало очень низкий коэффициент трения (0.09) и уменьшение износа более чем на 50%.

Влияние наночастиц оксида алюминия, полученных добавлением 10% объема  $Al_2O_3$  в ацетатный

буферный водный раствор, на трибологические свойства смеси изучали в работе [72]. При этом было показано, что коэффициент трения снижался в 2 раза, а износ стальной поверхности — в 10 раз. В работе [73] в качестве присадки использовали многостенные углеродные трубки, модифицированные привитым полиакриламидом, благодаря чему они были растворимы в полярных средах: воде, тетрагидрофуране, ацетоне. Полученные композиты обладали высокой противоизносной, антифрикционной и противозадирной активностью ввиду того, что, как полагают авторы, композиты ведут себя подобно малым, нанометровым подшипникам.

### Заключение

В мире все больше внимания уделяется вопросам, связанным со снижением негативного воздействия на окружающую среду, и отказ от использования двигателей внутреннего сгорания позволит внести значимый вклад в решение этой проблемы. На данный момент единственной альтернативой транспорту с двигателями внутреннего сгорания является электротранспорт, эксплуатация которого хоть и требует применения меньшего количества смазочных материалов, но к используемым маслам и пластичным смазкам предъявляются более жесткие эксплуатационные требования. Используемые в электромобилях смазочные материалы должны обеспечивать устойчивость к отказу как электромеханических, так и электрических компонентов, что требует при их создании использования всего накопленного опыта смазочного материаловедения. Как показал анализ научной и технической литературы, посвященной созданию и использованию смазочных материалов в электротранспорте, нефтяные базовые масла практически утратили свое значение, и на смену им пришли синтетические масла, применение которых позволяет достигать приемлемых эксплуатационных характеристик. Учитывая необходимость соответствия большого количества физико-химических и эксплуатационных показателей определенным требованиям, при создании смазочных материалов для электромобилей требуется применение большого количества присадок различного действия. Значительный прогресс достигнут при использовании наноразмерных присадок неорганической природы, которые обеспечивают высокие противоизносные и противозадирные свойства смазочных композиций. Также большое внимание уделяется электрическим свойствам и коррозионной активности смазочных материалов при их применении в электромобилях. При использовании такого

большого количества функциональных присадок особое внимание следует уделять возможности синергического действия, за счет чего можно уменьшить их концентрации при создании смазочного материала.

Таким образом, можно с уверенностью сделать вывод о том, что развитие электротранспорта будет способствовать совершенствованию фундаментальных и прикладных аспектов смазочного материаловедения с целью создания высококачественных смазочных материалов, удовлетворяющих современным требованиям.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН.

### Конфликт интересов

А. Л. Максимов является главным редактором Журнала прикладной химии, у остальных соавторов конфликт интересов, требующий раскрытия в данной статье, отсутствует.

### Информация об авторах

*Паренаго Олег Павлович*, д.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4869-4035>

*Лядов Антон Сергеевич*, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9969-7706>

*Максимов Антон Львович*, д.х.н., чл.-корр. РАН

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9297-4950>

### Список литературы

- [1] *Cerovsky Z., Mindl P.* Hybrid electric cars, combustion engine driven cars and their impact on environment // Int. Symp. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 2008. P. 739–743. <https://doi.org/0.1109/SPEEDHAM.2008.4581321>
- [2] *Romm J.* The car and fuel of the future // Energy Policy. 2006. V. 34. N 17. P. 2609–2614. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.025>
- [3] *Michaelis L.* Global warming impacts of transport // Sci. Total Environ. 1993. V. 134. N 1–3. P. 117–124. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(93\)90344-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(93)90344-6)
- [4] *Racz A. A., Muntean I., Stan S.-D.* A look into electric/hybrid cars from an ecological perspective // Procedia Technol. 2015. V. 19. P. 438–443. <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2015.02.062>
- [5] *Lozhkina V., Lozhkina O., Dobromirov V.* A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards



- of Saint Petersburg // *Transport. Res. Procedia*. 2018. V. 36. P. 453–458.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.124>
- [6] *Tie S. F., Tan C. W.* A review of energy sources and energy management system in electric vehicles // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013. V. 20. P. 82–102.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>
- [7] *Whitby R. D.* Lubricants and electric vehicles // *Tribol. & Lubricat. Technol.* 2018. V. 74. N 7. P. 104.
- [8] *Lugt P. M.* Modern advancements in lubricating grease technology // *Tribol. Int.* 2016. V. 97. P. 467–477.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.045>
- [9] *Farfan-Cabrera L. I.* Tribology of electric vehicles: A Review of critical components, current state and future improvement trends // *Tribol. Int.* 2019. V. 138. P. 473–486. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.06.029>
- [10] *Lugt P. M.* A review on grease lubrication in rolling bearings // *Tribol. Transactions.* 2009. V. 52. N 4. P. 470–480.  
<https://doi.org/10.1080/10402000802687940>
- [11] *Shah R., Tung S., Chen R., Miller R.* Grease performance requirements and future perspectives for electric and hybrid vehicle applications // *Lubricants*. 2021. V. 9. P. 40–56.  
<https://doi.org/10.3390/lubricants9040040>
- [12] *Clarke D.* Understanding lubricant requirements of hybrid-electric vehicles // *SAE Techn. Paper*. 2014. N 1. Paper 1476.  
<https://doi.org/10.4271/2014-01-1476>
- [13] Pat. WO 2018078290 A1 (publ. 2018). Composition for an electric vehicle.
- [14] Pat. WO 2020007853 A1 (publ. 2020). Composition for cooling and lubricating a propulsion system of an electric or hybrid vehicle.
- [15] Pat. WO 2020132078 A1 (publ. 2020). Low viscosity lubricating oil compositions with increasing flash point.
- [16] Pat. WO 2018078024 A1 (publ. 2018). Use of biodegradable hydrocarbon fluids in electric vehicles.
- [17] Pat. WO 2019133407 A1 (publ. 2019). Low traction/energy efficient liquid crystal base stock.
- [18] Pat. WO 2019133409 A1 (publ. 2019). Friction and wear reduction using liquid crystal base stock.
- [19] Pat. WO 2019133411 A1 (publ. 2019). Flat viscosity fluids and lubricating oils based on liquid crystal base stocks.
- [20] Pat. WO 2018067902 A1 (publ. 2018). Lubricating oil compositions for electric vehicle powertrains.
- [21] Pat. WO 2018067903 A1 (publ. 2018). Method for controlling electrical conductivity of lubricating oils in electric vehicle powertrains.
- [22] Pat. WO 2018067905 A1 (publ. 2018). Method for preventing or minimizing electrostatic discharge and dielectric breakdown in electric vehicle powertrains.
- [23] Pat. WO 2018067906 A1 (publ. 2018). High conductivity lubricating oils for electric and hybrid vehicles.
- [24] Pat. WO 2018067908 A1 (publ. 2018). Low conductivity lubricating oils for electric and hybrid vehicles.
- [25] Pat. WO 2020220009 A1 (publ. 2020). Lubricant for use in electric and hybrid vehicles and methods of using the same.
- [26] Pat. WO 2021011194 A1 (publ. 2021). Lubricants for electric and hybrid vehicle applications.
- [27] Pat. US 2021002572 A1 (publ. 2021). Lubricating oil composition, method for producing lubricating oil composition, and continuously variable transmission.
- [28] Pat. WO 011113851 A1 (publ. 2011). Lubricating composition.
- [29] *Kim H. J., Seo K. J., Kang K. H., Kim D. E.* Nano-lubrication: A Review // *Int. J. Precision Eng. Manufacturing*. 2016. V. 17. N 6. P. 829–841.  
<https://doi.org/10.1007/s12541-016-0102-0>
- [30] *Оганесова Э. Ю., Лядов А. С., Паренаго О. П.* Наноразмерные присадки к смазочным материалам // *ЖПХ*. 2018. Т. 91. № 10. С. 1371–1387.  
<https://doi.org/10.1134/S0044461818100018>  
*[Oganeseva E. Yu., Lyadov A. S., Parenago O. P.]* Nanosized additives to lubricating materials // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 10. P. 1559–1573.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427218100014>
- [31] *Mustafa W. A. A., Dassenoy F., Sarno M., Senatore A.* A Review on potentials and challenges of nanolubricants as promising lubricants for electric vehicles // *Lubricat. Sci.* 2022. V. 34. V. 1. P. 1–29.  
<https://doi.org/10.1002/lc.1568>
- [32] *He Q., Li A., Guo Y., Liu S., Kong L.-H.* Effect of nanometer silicon dioxide on the frictional behavior of lubricating grease // *Nanomater. Nanotechnol.* 2017. V. 7. Article 593.  
<https://doi.org/10.1177/1847980417725933>
- [33] *He Q., Li A., Wang Z., Zhang Y., Kong L., Yang K.* Tribological behavior of ZnO–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanoparticles-based lubricating grease // *J Experimental Nanosci.* 2018. V. 13. N 1. P. 231–244.  
<https://doi.org/10.1080/17458080.2018.1511923>
- [34] *Mohamed A., Osman T. A., Khattab A., Zaki M.* Tribological behavior of carbon nanotubes as an additive on lithium grease // *J. Tribol.* 2015. V. 137. N 1. Paper TRIB-13-1131.  
<https://doi.org/10.1115/1.4028225>
- [35] *Ashour M. E., Osman T. A., Khattab A., Elshalakny A. B.* Novel tribological behavior of hybrid MWCNTs/MLNGPs as an additive on lithium grease // *J. Tribol.* 2017. V. 139. N 4. Paper TRIB-16-1050.  
<https://doi.org/10.1115/1.4035345>
- [36] *Nazir M. H., Khan Z. A., Saeed A., Siddaiah A., Menezes P. L.* Synergistic wear-corrosion analysis and modelling of nanocomposite coatings // *Tribol. Int.* 2018. V. 121. P. 30–44.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.027>

- [37] Irtegov Y., An V., Machekhina K., Lemachko N. Influence of copper nanoparticles on tribological properties of nanolamellar tungsten disulfide // *Key Eng. Mater.* 2016. V. 712. P. 133–136. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.133>
- [38] Kumara C., Meyer H. M., Qu J. Synergistic interactions between silver and palladium nanoparticles in lubrication // *ACS Appl. Nano Mater.* 2019. V. 2. N 8. P. 5302–5309. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01248>
- [39] Raadnuj S., Kleesuwan S. Electrical pitting of grease-lubricated rolling and sliding bearings: A Comparative study // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2012. V. 364. Article 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/364/1/012041>
- [40] Sunahara K., Ishida Y., Yamashita S., Yamamoto M., Nishikawa H., Matsuda K., Kaneta M. Preliminary measurements of electrical micropitting in grease-lubricated point contacts // *Tribol. Transactions.* 2011. V. 54. N 5. P. 730–735. <https://doi.org/10.1080/10402004.2011.597543>
- [41] Romanenko A., Muetze A., Ahola J. Effects of electrostatic discharges on bearing grease dielectric strength and composition // *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2016. V. 52. N 6. P. 4835–4842. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2596239>
- [42] He F., Xie G., Luo J. Electrical bearing failures in electric vehicles // *Friction.* 2020. V. 8. P. 4–28. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0356-5>
- [43] Chen Y., Jha S., Raut A., Zhang W., Liang H. Performance characteristics of lubricants in electric and hybrid vehicles: A Review of current and future needs // *Frontiers Mech. Eng.* 2020. V. 6. Article 571464. <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.571464>
- [44] Suzumura J. Prevention of electrical pitting on rolling bearings by electrically conductive grease // *Quarterly Report of RTRI.* 2016. V. 57. N 1. P. 42–47. [https://doi.org/10.2219/rtriqr.57.1\\_42](https://doi.org/10.2219/rtriqr.57.1_42)
- [45] Ge X., Xia Y., Cao Z. Tribological properties and insulation effect of nanometer TiO<sub>2</sub> and nanometer SiO<sub>2</sub> as additives in grease // *Tribol. Int.* 2015. V. 92. P. 454–461. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.031>
- [46] Guo X., Song K., Liang S., Wang X., Zhang Y. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size on electrical wear performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu composites // *Tribol. Transactions.* 2016. V. 59. P. 170–177. <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1061079>
- [47] Christensen G., Yang J., Lou D., Hong G., Hong H., Tolle C., Widener C., Bailey C., Hrabe R., Younes H. A. Carbon nanotubes grease with high electrical conductivity // *Synth. Met.* 2020. V. 268. Article 116496. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116496>
- [48] Turkson R., Yan F., Ali M., Liu B., Hu J. Modeling and multi-objective optimization of engine performance and hydrocarbon emissions via the use of a computer aided engineering code and the NSGA-II genetic algorithm // *Sustainability.* 2016. V. 8. N 1. Article 72. <https://doi.org/10.3390/su8010072>
- [49] Hamid Y., Usman A., Afaq S. K., Park C. W. Numeric based low viscosity adiabatic thermo-tribological performance analysis of piston-skirt liner system lubrication at high engine speed // *Tribol. Int.* 2018. V. 126. P. 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.05.022>
- [50] Van Rensselar J. The tribology of electric vehicles // *Tribol. Lubrication Technol.* 2019. V. 75. N 1. P. 34–43.
- [51] Kalin M., Kogovšek J., Remškar M. Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS<sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives // *Wear.* 2012. V. 280–281. P. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.01.011>
- [52] Chou R., Battez A. H., Cabello J. J., Viesca J. L., Osorio A., Sagastume A. Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles // *Tribol. Int.* 2010. V. 43. P. 2327–2332. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.08.006>
- [53] Ali M. K. A., Xianjun H., Turkson R. F., Peng Z., Chen X. Enhancing the thermophysical properties and tribological behaviour of engine oils using nano-lubricant additives // *RSC Advances.* 2016. V. 6. P. 77913–77924. <https://doi.org/10.1039/C6RA10543B>
- [54] Xiong S., Liang D., Zhang B., Wu H., Mao X. Tribological behavior of mineral and synthetic ester base oil containing MoS<sub>2</sub> nanoparticles // *J. Dispersion Sci. Technol.* 2019. V. 42. N 4. P. 493–502. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1700132>
- [55] Alves S. M., Barros B. S., Trajano M. F., Ribeiro K. S. B., Moura E. Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions // *Tribol. Int.* 2013. V. 65. P. 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.03.027>
- [56] Guzman Borda F. L., Ribeiro de Oliveira S. J., Seabra Monteiro Lazaro L. M., Kalab Leiroz A. J. Experimental investigation of the tribological behavior of lubricants with additive containing copper nanoparticles // *Tribol. Int.* 2018. V. 117. P. 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.08.012>
- [57] Soleimani M., Dehabadi L., Wilson L. D., Tabil L. G. Antioxidants classification and applications in lubricants. *Lubrication tribology, lubricants and additives* / Ed. by D. Johnson. London: IntechOpen, 2018. 132 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72621>
- [58] Li D., Xie W., Fang W. Preparation and properties of copper-oil-based nanofluids // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. V. 6. Article 373. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-373>

- [59] *Rasheed A. K., Khalid M., Javeed A., Rashmi W., Gupta T. C. S. M., Chan A.* Heat transfer and tribological performance of graphene nanolubricant in an internal combustion engine // *Tribol. Int.* 2016. V. 103. P. 504–515.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.08.007>
- [60] *He Z., Xiong L., Han S., Chen A., Qui J., Fu X.* Tribological and antioxidation synergistic effect study of sulfonate-modified nano calcium carbonate // *PLoS One.* 2013. V. 8. N 5. Article e62050.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062050>
- [61] *Zaarour M., el Siblani H., Arnault N., Boullay P., Mintova S.* Zeolite nanocrystals protect the performance of organic additives and adsorb acid compounds during lubricants oxidation // *Materials.* 2019. V. 12. N 17. P. 2830–2842.  
<https://doi.org/10.3390/ma12172830>
- [62] *Lee J., Kuchibhotla A., Banerjee D., Berman D.* Silica nanoparticles as copper corrosion inhibitors // *Materials Research Express.* 2019. V. 6. N 8. Article 0850e3. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2270>
- [63] *Berman D., Erdemir A., Sumant A.* Graphene: A New emerging lubricant // *Mater. Today.* 2014. V. 17. N 1. P. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.12.003>
- [64] *Lovell M. R., Kabir M. A., Menezes P. L., Higgs C. F.* Influence of boric acid additive size on green lubricant performance // *Philosophical Transactions. A. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences.* V. 368. P. 4851–68.  
<https://doi.org/10.1098/Rsta.2010.0183>
- [65] *Sawyer W. G., Ziegert J. C., Schmitz T. L., Barton T.* In situ lubrication with boric acid: Powder delivery of an environmentally benign solid lubricant // *Tribol. Transactions.* 2006. V. 49. P. 284–290.  
<https://doi.org/10.1080/05698190600639939>
- [66] *Pei X., Hu L., Liu W., Hao J.* Synthesis of water-soluble carbon nanotubes via surface initiated redox polymerization and their tribological properties as water-based lubricant additive // *Eur. Polym. J.* 2008. V. 44. N 8. P. 2458–2464.  
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.06.016>
- [67] *He A., Huang S., Yun J.-H., Jiang Z., Stokes J. R., Jiao S., Wang L., Huang H.* The pH-dependent structural and tribological behaviour of aqueous graphene oxide suspensions // *Tribol. Int.* 2017. V. 116. P. 460–469.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.08.008>
- [68] *He A., Huang S., Yun J.-H., Jiang Z., Stokes J. R., Jiao S., Wang L., Huang H.* Tribological characteristics of aqueous graphene oxide, graphitic carbon nitride, and their mixed suspensions // *Tribol. Lett.* 2018. V. 66. N 1. P. 42–54.  
<https://doi.org/10.1007/s11249-018-0992-3>
- [69] *Su F., Chen G., Huang P.* Lubricating performances of graphene oxide and onion-like carbon as water-based lubricant additives for smooth and sand-blasted steel discs // *Friction.* 2020. V. 8. N 1. P. 47–57.  
<https://doi.org/10.1007/s40544-018-0237-3>
- [70] *Zhao J., Yang G., Zhang Y., Zhang S., Zhang P.* A Simple preparation of HDA-cus nanoparticles and their tribological properties as a water-based lubrication additive // *Tribol. Lett.* 2019. V. 67. N 3. Article 88. <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1206-3>
- [71] *Shariatzadeh M., Grecov D.* Aqueous suspensions of cellulose nanocrystals as water-based lubricants // *Cellulose.* 2019. V. 26. N 7. P. 4665–4677.  
<https://doi.org/10.1007/s10570-019-02398-w>
- [72] *Radice S., Mischler S.* Effect of electrochemical and mechanical parameters on the lubrication behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in aqueous suspensions // *Wear.* 2006. V. 261. N 9. P. 1032–1041.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.034>
- [73] *Pei X., Hu L., Liu W., Hao J.* Synthesis of water-soluble carbon nanotubes via surface initiated redox polymerization and their tribological properties as water-based lubricant additive // *Eur. Polym. J.* 2008. V. 44. N 8. P. 2458–2464.  
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.06.016>