

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-117-131](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-117-131)



УДК: 62-72

UDC: 62-72

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

ANALYSIS OF THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF MODIFIED VEGETABLE OILS AND PROSPECTS OF THEIR USE IN ROAD TRANSPORT

✉¹ **Медведев Илья Николаевич**
к.т.н., старший преподаватель кафедры промышленного транспорта строительства и геодезии Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ,
e-mail: medved-vrn82@mail.ru

✉¹ **Medvedev Ilya Nikolaevich**
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozova, RF
e-mail: medved-vrn82@mail.ru

Савченко Станислав Игоревич
магистрант лесопромышленного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Savchenko Stanislav Igorevich
master student of the forestry faculty of the Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozova, RF

Жужукин Константин Викторович
аспирант лесопромышленного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Zhuzhukin Konstantin Viktorovich
post-graduate student of the forestry faculty of the Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozova, RF

Жужукин Николай Викторович
аспирант машиностроительного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Zhuzhukin Nikolai Viktorovich
post-graduate student of the mechanical engineering faculty of the Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozova, RF

Аннотация.

Ресурсо- и энергосбережение является важной глобальной проблемой. Смазочные материалы на основе растительных масел приобретают все большее значение на рынке промышленных смазочных материалов из-за их биоразлагаемости, возобновляемости, минимального воздействия на окружающую среду, отличных трибологических характеристик и строгих экологических норм. В этой обзорной статье рассмотрены различные аспекты биосмазочных материалов, такие как химический состав различных растительных масел, методы химической модификации, исполь-

Annotation.

Resource and energy saving is an important global problem. Vegetable oil based lubricants are becoming increasingly important in the industrial lubricants market due to their biodegradability, renewability, minimal environmental impact, excellent tribological performance and stringent environmental regulations. This review article discusses various aspects of biolubricants, such as the chemical composition of various vegetable oils, chemical modification methods used to synthesize biolubricants, the physicochemical and rheological properties of biolubricants, the tribological characteristics of

зубы для синтеза биосмазков, физико-химические и реологические свойства биосмазков, трибологические характеристики биосмазков в различных условиях, а также различные наночастицы, используемые для повышения производительности биосмазков. Кроме того, рассмотрены перспективы применения биосмазков в автомобильном транспорте.

Ключевые слова: ТРИБОЛОГИЯ, БИОСМАЗКА, НАНОЧАСТИЦЫ, ПРИСАДКИ, СИНТЕЗ, АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

biolubricants under various conditions, and various nanoparticles used to improve performance. biolubricants. In addition, the prospects for the use of bio-lubricants in road transport are considered.

Keywords: TRIBOLOGY, BIOLUBRICATION, NANOPARTICLES, ADDITIVES, SYNTHESIS, AUTOMOBILE TRANSPORT

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Значительный прогресс в промышленном производстве, распространении автомобильного транспорта и неуклонный рост человеческих потребностей привели к увеличению использования различных механических устройств и агрегатов, для обеспечения бесперебойной работы и максимальной эффективности которых необходимо применение смазочных материалов [1]. Спрос на смазочные материалы резко возрос в связи с промышленной революцией и ростом продаж автомобилей. Согласно исследованию мирового рынка, в 2019 году было использовано 36,8 млн. тонн смазочных материалов, с прогнозируемым увеличением спроса примерно на 2,1% каждый год. В 2020 году объем мирового рынка смазочных материалов оценивался в 125,81 млрд. долларов США. Кроме того, ожидается, что в период с 2021 по 2028 год рынок будет расти в среднем на 3,7%. Продажи и производство смазочных материалов играет жизненно важную роль в экономике страны, поскольку быстрое истощение запасов ископаемого топлива вызывает внезапные колебания цен на смазочные материалы [2].

Трибологические исследования показывают, что одна треть механической энергии теряется в виде тепла в процессе трения между поверхностями. В автомобильном машиностроении 30 % потерь энергии приходится на элементы включающие подшипниковые или трущиеся поверхности (поршневой узел, систему трансмиссии, подшипники, распределительный и коленчатый вал, клапанный механизм и т. д). Контроль трибологических характеристик с помощью смазочных материалов может приводить к экономии энергии на 40–50 %. [3].

Основной функцией смазочного материала является создание защитного слоя между трущимися поверхностями и предотвращение их трения и износа. Кроме того, смазка может быть использована для отвода тепла от поверхностей, защиты от окисления и коррозии, транспортировки загрязнений к фильтрам, обеспечения демпфирующего и амортизирующего эффекта и герметизации. К современным смазочным материалам предъявляются высокие требования такие как: высокий индекс вязкости, широкий диапазон рабочих температур, высокая термическая стабильность, низкий износ и коэффициент трения, а также высокая стойкость к коррозионному окислению. Основные классы смазочных масел представлены на рисунке 1 [4].

Спрос на смазочные масла неуклонно растет, а традиционные смазочные материалы на основе минеральных масел несут в себе ряд экологических проблем: не поддаются биологическому разложению, напрямую загрязняют почвы и грунтовые воды, сокращают рост деревьев и продолжительность жизни водных организмов, являются истощаемым ресурсом, загрязняют воздух летучими и токсичными компонентами.

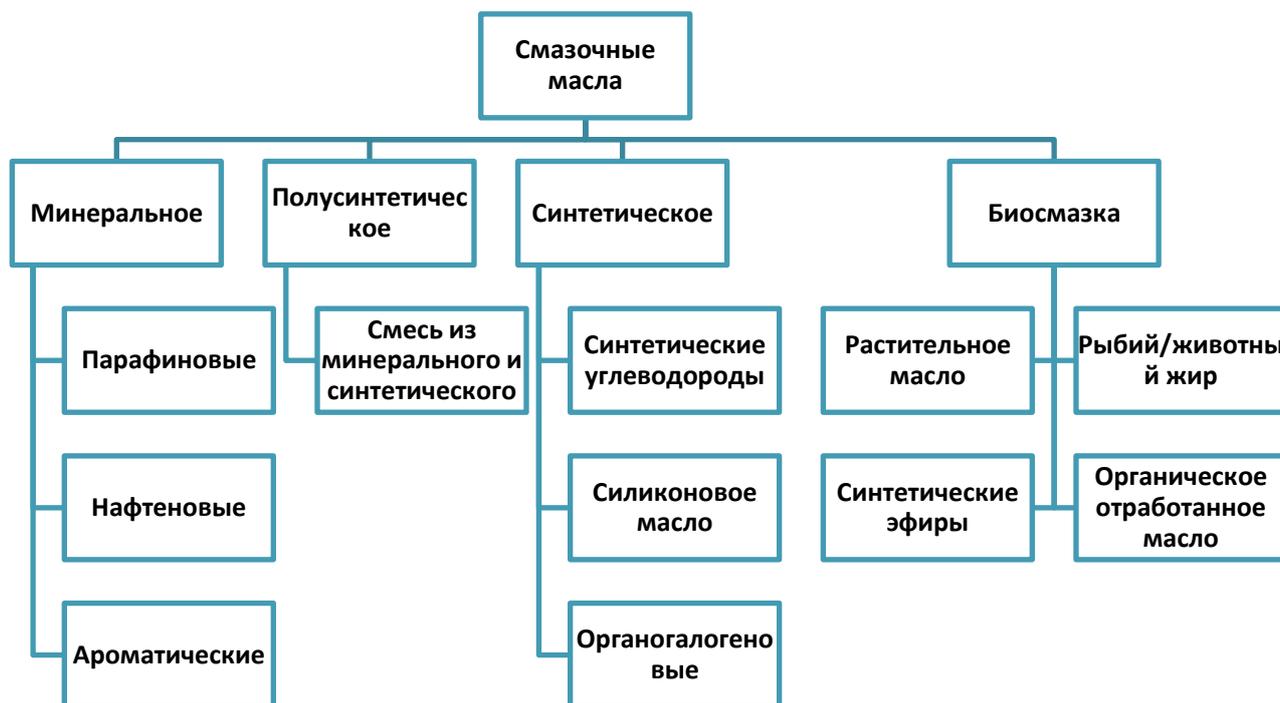


Рисунок 1 – Основные классы смазочных материалов

Степень биоразлагаемости смазочных материалов на нефтяной основе составляет от 10 до 30 %. Современная индустрия смазочных материалов становится все более экологически ответственной, уделяя особое внимание устойчивости и сохранению окружающей среды за счет экологически чистых смазочных материалов на биологической и растительной основе. Мировые экологические инициативы значительно возросли в связи с повышением цен на нефтяное масло, истощения углеводородных запасов и строгих правительственных постановлений об использовании минерального масла. Растущая озабоченность по поводу воздействия минеральных смазочных материалов на окружающую среду и истощения запасов ископаемого топлива побуждает исследователей искать смазочные материалы на биологической основе [5].

Существуют исследования, в которых природные материалы, такие как растительное масла и животные жиры, рассматриваются в качестве потенциального источника для производства смазочных материалов из-за наличия в их составе более высокого содержания жирных кислот с целью применения их в автомобильном транспорте. Применение данных смазочных материалов в автомобилях зависят от длины углеродной цепи, степени ненасыщенности, типа функциональной группы, разветвленной природы соединения.

Передовые исследования в области новых смазочных материалов, использования присадок и наночастиц могут значительно снизить влияние трения и износа в машинах. В связи с этим целью данной статьи является всесторонний обзор литературы в области использования смазочных материалов на биологической основе и различных компонентов данных масел с учетом их трибологических, физико-химических, реологических свойств и дисперсионных свойств.

2 Материалы и методы исследования

Для поиска документов был проведен поиск в нескольких базах данных. Междисциплинарные базы данных включали Scopus и Web of Science (все индексированные базы данных). В данный обзор также были включены источники из Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) в базе eLibrary. Литература, включенная в обзор, относится к периоду с 2000 по 2021 год. Первым этапом был выбор критериев поиска, в котором были определены область исследования, ключевые слова и тип публикации. Были рассмотрены такие типы публикаций, как материалы конференций, специальные выпуски исследовательских работ, обзорные статьи, материалы конференций, публикации в специальных выпусках, книги, отчеты и патенты. Поиск статей осуществлялся по следующим ключевым словам: смазочные материалы на растительной основе, биосмазка, синтез и характеристика биосмазки, наночастицы, наносмазка, реологические свойства и трибологические свойства.

3 Результаты и их обсуждения

3.1 Сырье и химический состав смазочных материалов на растительной основе

Около 95 % смазочных материалов, используемых в промышленности, изготовлены на минеральной и синтетической основе и опасны для окружающей среды [6]. Смазочные материалы на биологической основе являются одной из лучших альтернатив нефтяным смазочным материалам, поскольку они не только экологически безопасны, менее токсичны и возобновляемы, но также обладают высокими смазывающими характеристиками (высокий индекс вязкости, высокая температура вспышки и низкая летучесть) [7,8,9].

Сырьем для получения биосмазок являются материалы на биологической основе, такие как растительные масла (рисовые отруби, пальмовые, соевые бобы, кукуруза, кокос, арахис, подсолнечник, ятрофа, касторовое масло, канола, отработанное кулинарное масло), жиры растительного и животного происхождения, экологически безопасные углеводороды [10,11].

На данный момент смазочные материалы на основе растительного масла уже применялись в качестве моторной смазки, смазки для коробки передач, гидравлической жидкости, тракторного масла, смазки для амортизаторов, жидкости для металлообработки, пищевой промышленности, медицинского оборудования и т. д. [12].

Химическая структура растительного масла представляет собой одну молекулу глицерина (органического спирта), химически связанного с тремя жирными кислотами (органическая кислота), известными как триглицериды [13]. Жирные кислоты классифицируются на основе количества двойных связей, присутствующих в углеродной цепи: насыщенные и ненасыщенные [14]. Насыщенные жирные кислоты не содержат двойных связей в своей углеродной цепи (например, стеариновая кислота и пальмитиновая кислота). Ненасыщенные жирные кислоты содержат двойные связи в своей углеродной цепи. Если жирная кислота состоит из одной двойной связи, то она называется мононенасыщенной (например, олеиновая кислота), а если она содержит две или более двойных связей, то она называется полиненасыщенной (например, линолевая кислота и линоленовая кислота) [15]. Сырье с высоким содержанием олеиновой кислоты является предпочтительным из-за его низкой температуры плавления, подходящей вязкости и термоокислительной стабильности. Основные растительные масла и состав их кислот представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Растительные масла, применяемые в виде смазочных масел и их химический состав.

Растительное масло	Насыщенные жирные кислоты				Ненасыщенные жирные кислоты		
	Лауриновая кислота (C12:0)	Миристиновая кислота (C14:0)	Пальмитиновая кислота (C16:0)	Стеариновая кислота (C18:0)	Олеиновая кислота (C18:1)	Линолевая кислота (C18:2)	Линоленовая кислота (C18:3)
	C ₁₂ H ₂₈ O ₂	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₀ O ₂
Касторовое	–	–	2,6	1,5	4,74	8,36	0,5
Рапсовое	–	0,1	3,9	3,1	60,2	21,1	11,1
Хлопковое	–	1	22	3	19	54	1
Тыквенное	–	0,17	13,1	5,7	24,9	54,2	0,12
Рапсовое	–	0,25	3,5	2	57	19,5	8,5
Сафлоровое	–	0,1	5	1,5	75	13	0,15
Кунжутное	0,38	0,18	9	5	37,69	46,59	0
Соевое	0,08	0,1	10,3	4,4	25,1	53,2	6,8
Подсолнечное масло	0,02	0,09	6,5	5	27	60	1
Ятрофа Куркас	–	0,05	10,18	5,45	42,39	34,1	0,5
Каранджи	–	–	10,5	8	52	17	2,09
Махуа	–	–	17,8	14	46,3	17,9	1,7
Моринги	–	–	5,50	5,70	73,20	1,00	
Горчичное	–	–	3,8	2,5	39	28,9	15,1
Нима	–	–	18	18	44	19	0,5
Каучуковое	–	–	9,3	8,4	25,4	41,1	15,3
Миндальное	0,09	0,07	6,8	2,3	62,2	22,8	2
Авокадо	0	0	15	1	65	14	1,5
Кокосовое	47	18	9	3	6	2	0

окончание таблицы 1.

продолжение таблицы 1.

Расти- тельное масло	Насыщенные жирные кислоты				Ненасыщенные жирные кислоты		
	Лаури- новая кислота (C12:0)	Миристи- новая кис- лота (C14:0)	Пальмити- новая кис- лота (C16:0)	Стеари- новая кислота (C18:0)	Олеино- вая кис- лота (C18:1)	Линоле- вая кис- лота (C18:2)	Линоле- новая кислота (C18:3)
	C ₁₂ H ₂₈ O ₂	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₀ O ₂
Кукуруз- ное	–	–	11.1	4.3	24,6	52,3	6.2
Масло ви- ноградных косточек	0,01	0,05	6,6	2,40	11.50	79	0,15
Арахисо- вое	1,6	1,3	12.3	4.1	47,8	28,6	–
Льняное	–	0,05	5	3	22	16	53
Оливковое	0	0	14	3	69	12	1,6
Пальмо- вое масло	48,7	15,6	7.6	1,8	14,8	2,6	0

Двойная связь и длина цепи две переменные, определяющие свойства смазочных материалов. Двойная связь в жирной кислоте снижает вязкость и термоокислительную стабильность, тогда как длинная цепь связана с более высокой вязкостью и температурой плавления. За счет полярной карбоновой части жирных кислот биосмазки адсорбируются на металлических поверхностях и уменьшают контакт двух трущихся поверхностей, что позволяет создать однослойную смазочную пленку. Трибологические характеристики растительного масла могут быть улучшены за счет увеличения длины цепей жирных кислот, количества сложноэфирных групп и линейности сложного эфира полиола [16].

Длинные цепи жирных кислота полярные группы в структуре растительных масел делают их пригодными для использования в качестве смазок в смешанном или пограничном режимах [17]. Жирные кислоты значительно снижают адгезию между контактирующими металлами за счет восстановления и адсорбции на поверхностях. Небольшое добавление жирных кислот в неполярное минеральное масло или наличие чистых углеводов снижает трение и износ [18]. Для производства биосмазок доступны пять базовых компонентов; полиалкиленгликоли, высоконенасыщенное или высокоолеиновое растительное масло, сложные эфиры полиолов, полиальфаолефины с низкой вязкостью и сложные эфиры двухосновных кислот. Маслосодержащие полярные группы, такие как сложные эфиры и карбоновые кислоты склонны к адсорбции и реакции с металлическими поверхностями, что приводит к эффектам граничной смазки [19].

Образование свободных радикалов инициирует окисление растительного масла за счет удаления атомов водорода из метиленовой группы, примыкающей к двойной связи. Пероксирадикал образуется при взаимодействии свободных радикалов с кислородом. Затем пероксирадикалы могут атаковать другую молекулу липида, удаляя атом водорода с образованием гидроперекиси и генерируя другой свободный радикал для распространения процесса окисления. Растительное масло с большим количеством ненасыщенных жирных кислот легче

окисляется благодаря двойной связи в углерод-углеродной цепи жирной кислоты. Растительное масло содержит структуру триацилглицерина с составом ненасыщенных и полярных жирных кислот, что приводит к образованию толстой пленки. Жирные кислоты, такие как олеиновая, линолевая и линоленовая, существенно влияют на выбор растительного масла для смазки. Олеиновая кислота снижает трение, тогда как линолевая и линоленовая кислоты увеличивают скорость коррозии снижают термоокислительную стабильность [20].

Синтетические сложные эфиры, полученные из растительного масла, представляют собой класс базовых масел, обеспечивающих хорошую устойчивость к окислению, текучесть при низких температурах и низкую летучесть при более высоких температурах. Они обладают превосходным сродством к металлическим поверхностям, что приводит к высоким трибологическим свойствам. Более высокое содержание сложных эфиров в смазочном масле приводит к более толстой смазочной пленке и дополнительно улучшает смазывающие свойства [21]. Основным недостатком синтетических эфиров является их высокая стоимость, в связи с чем они реже используются в промышленности [22].

Формирование смазочной пленки в трибосистеме в значительной степени зависит от условий эксплуатации, таких как скорость трения, нагрузка, условия контакта и т. д., и впоследствии влияет на трибологические характеристики. Согласно, знаменитой кривой Штрибека, применяемой для описания гидродинамических процессов трения, между трущимися частями и смазочной пленкой существует три основных режима трения: граничное, смешанное или эластогидродинамическое, а также вязкостное [23]. Трибологические, реологические, окислительные и низкотемпературные свойства биосмазок во многом зависят от вида сырья, функциональных групп, а также полярных и неполярных групп, присутствующих в углеводородной части молекул. В процессе граничного трения тонкая и нестабильная трибопленка образуется в процессе повторяющихся условий нагрузки и низкой скорости, что приводит к трению контактирующих поверхностей друг о друга и напрямую сказывается на износе поверхностей. При данном типе трения толщина трибопленки меньше шероховатости поверхности, что служит необходимостью использования добавок, например, наночастиц, и имеет важное значение для защиты контактирующих поверхностей. Способность к адсорбции и трибохимическим реакциям часто влияет на характеристики смазочных материалов в данном режиме работы смазочного материала. При адсорбции молекулы полярных групп прикрепляются к поверхности трения, уменьшая шероховатость контакта, трение и износ.

Снижение контактной нагрузки и увеличение скорости скольжения переводят смазку на смешанный и упругогидродинамические режимы с коэффициентом трения в диапазоне 0,01–0,10. При смешанном и упругогидродинамическом режимах толщина трибопленки примерно в 1–3 раза превышает шероховатость поверхности.

Свойства биосмазочных материалов в первую очередь зависят от атомной и молекулярной структуры, их связи и взаимодействия, которые напрямую влияют на характеристики трения и износа, летучесть и диапазон рабочих температур. Важным требованием к хранению и транспортировке смазочных материалов является летучесть и огнестойкость, которые могут быть выявлены при рассмотрении тепловых аспектов. Большинство биосмазок имеют высокую температуру вспышки выше 200 °С, что указывает на энергонезависимую природу масла. Смазочные материалы на основе растительных масел обеспечивают безопасность в цехах, поскольку высокие температуры вспышки снижают риск возгорания при утечке. Биосмазки имеют более низкую температуру застывания по сравнению с минеральными маслами, что обеспечивает превосходную смазывающую способность при холодном пуске. Кислотное число определяет количество кислоты или основания, содержащихся в химическом соединении, и указывает степень разложения смазочного материала [24].

Однако, в условиях работы с ударными нагрузками при высоких скоростях и температурой ни биологические ни нефтяные смазочные материалы не могут обеспечить достаточную защиту от износа у трущихся поверхностей. В связи с этим в смазочные материалы необходимо добавление присадок. Перспективным направлением в данной области являются

использование различных наноматериалы, обзор которых будет представлен в следующем разделе.

3.2 Применение присадок в виде наноматериалов для изменения свойств смазочных материалов на растительной основе.

Присадки представляют собой химические вещества, смешиваемые с базовыми маслами для придания им определенных характеристик, что и позволят смазочному материалу удовлетворять потребности в высоких эксплуатационных характеристиках [25, 26]. Правильное смешивание присадок с базовым маслом позволяет улучшать трибологические характеристики за счет минимизации трения, повышения износостойкости и вязкости, улучшения индекса вязкости и устойчивости к окислению, контроля коррозии и уменьшения загрязнения.

Все присадки в основном классифицируются на; антиоксиданты, противоизносные, модификаторы вязкости, модификаторы трения, присадки экстремального давления, пеногасители, ингибиторы коррозии, депрессоры температуры застывания, диспергаторы, детергенты и присадки для контроля загрязнения [27-30]

Несмотря на ряд преимуществ, биосмазочные материалы не получили широкого распространения из-за ключевых проблем и сложностей, связанных с их эксплуатацией и производством. Биосмазки обладают двумя основными неблагоприятными свойствами: плохими низкотемпературными характеристиками и низкой устойчивостью к термическому окислению [31]. Нивелирование данных недостатков может быть достигнуто добавлением наночастиц в смазочные материалы, которые отличаются высоким отношением площади их поверхности к объему. Наноматериалы применяемый в качестве присадок классифицируют по химическому составу и выделяют следующие основные группы: металлы, оксиды металлов, углеродные наночастицы, сульфиды, нанокompозиты и редкоземельные соединения [32].

Помимо лучшей биоразлагаемости, смазочные материалы на основе растительных масел имеют ряд преимуществ по сравнению с минеральными или синтетическими смазочными материалами: высокий индекс вязкости и температура вспышки, более низкая летучесть и токсичность или ее полное отсутствие, лучшая смазывающая способность, высокая растворяющая способность для присадок, более высокая добавленная стоимость и меньшая потери на испарение [33]. Тем не менее, у биосмазок есть некоторые недостатки, такие как нестабильность при окислении, низкотемпературная текучесть и образование шлама. Наночастицы являются подходящими химическими добавками для улучшения физико-химических свойств масла. В таблице 2 представлены основные классы наночастиц используемых для изменения свойств смазочных материалов.

Таблица 2 –Типы наночастиц.

Типы наночастиц	Пример	Описание
Металл	Ag, Au, Zn, Cu, Sn, Ni, Ti, Bi, Fe, Co, Pd	Добавление наночастиц металлов приводит к образованию адсорбционной пленки между трущимися поверхностями и снижению трения и износа за счет создания эффекта шарикоподшипника.
Оксиды металлов	ZrO ₂ , TiO ₂ , Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ , ZnO, CuO, CeO ₂ , ZnAl ₂ O ₃ , SiO ₂ ,	Подобно металлической наносмазке, работают механизмы смазки оксидом металла, включая образование адсорбционной пленки, эффект шарикоподшипника и эффект спекания или восстановления.

окончание табл. 2

Типы наночастиц	Пример	Описание
Наночастицы на основе углерода	Фуллерены, нанотрубки, графен, алмазные частицы	Молекулярная структура (листовая, трубчатая и луковичная) играет важную роль. Он обеспечивает хорошие трибологические свойства вместе с экологически чистыми характеристиками для устойчивого будущего.
Сульфиды	MoS ₂ , CuS, WS ₂ , Ni-MoO ₂ S ₂	Он демонстрирует механизм защитной пленки. Трение между трущимися поверхностями выделяет тепло и приводит к образованию трибопленки, которая способствует адсорбции и повышает трибологические характеристики.
Нанокompозиты	Al ₂ O ₃ /TiO ₂ , Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , Cu/SiO ₂ , Cu/оксиды графена, TiO ₂ /gC ₃ N ₄ , серпентин/La(OH) ₃	Нанокompозит состоит из комбинации различных наночастиц и показывает отличные трибологические характеристики благодаря наличию различных фаз.
Наночастицы на основе бора	Борат цинка, h-BN, NCB, BN	Он безопасен для окружающей среды и обладает высокой термической стабильностью, несущей способностью и отличными эксплуатационными характеристиками AW.
Редкоземельный материал	CeO ₂ , LaF ₃ , La(OH) ₃ , Y ₂ O ₃ , CeBO ₃	La и Ce — самые популярные элементы. Механизм смазки в основном включает образование трибопленки или адсорбционной пленки.

Разработка эффективных присадок к смазочным материалам привлекла большое внимание в промышленности и академических кругах для удовлетворения сложных технологических требований. Различные присадки смешиваются с базовым маслом для повышения долговечности и эффективности смазки. До сих пор в качестве смазочных добавок для снижения трения и износа исследовались различные наночастицы и соединения, поскольку они интенсивно взаимодействуют с подложками и образуют защитный слой на трущихся поверхностях. Добавление подходящих наночастиц в биосмазку является одним из методов повышения устойчивости к окислению, защиты от износа, трения и коррозии. На рисунке 2 представлена диаграмма распределения применения наночастиц от их общего потребления в промышленности по данным [34].

Концентрация наночастиц в базовом масле является еще одним важным фактором, влияющим на смазывающие свойства [35]. Добавление слишком большого или слишком малого количества наночастиц в смазку может увеличить трение и износ соприкасающихся поверхностей [36]. Концентрация наночастиц в смазочном масле зависит от: времени и метода диспергирования, функции и состояния поверхности смазки. Широко используются сферические наноматериалы, поскольку они демонстрируют высокую несущую способность и противозадирные характеристики за счет эффекта качения [37]. Сульфиды металлов десятилетиями использовались в индустрии смазочных материалов, в том числе в качестве присадок к твердым и жидким смазочным материалам. Механизмы смазки MoS₂ были тщательно изучены.



Рисунок 2 – Использование наночастиц при добавлении в базовые смазочные масла

Основную роль во взаимодействии данной наночастицы играет ламинарная структура серы. Под воздействием тепла, выделяемого в процессе трения поверхностей, и высокого контактного напряжения между частями будет происходить трибохимическая реакция между наночастицами и касаемой поверхностью, в результате чего происходит образование пленки препятствующей непосредственному трению поверхностей. Использование различных подложек будет приводить к образованию трибопленок различного химического состава. Определяющие свойства трибопленки в основном включают твердость, адгезионные свойства и шероховатость. Наличие трибопленки способствует появлению адсорбционных процессов. Адсорбционный слой состоит из MoS_2 , смазочного материала и их химически связанных соединений.[38].

Наноразмерный диоксид титана (TiO_2) имеет более низкую плотность и молярную массу, а также более высокие температуры плавления и кипения, чем другие добавки наночастиц. Из-за синергетических эффектов более чем одного типа наночастиц композитные материалы обычно демонстрируют лучшие характеристики, чем отдельные. Стоит отметить, что диоксид кремния (SiO_2) является одним из наиболее распространенных нанокompозитов в качестве присадок к смазочным материалам.

Еще одним существенным параметром напрямую влияющем на трибологические свойства смазок является размер используемых наночастиц. Исследования показывают, что добавление наноматериалов размером от 2 до 120 нм снижает трение и износ. Форма и размер наноаддитивов влияют на характеристики трения и износа при смешивании со смазочным маслом. Диаметр сферических и трубчатых частиц и толщина пластинки составляют менее 100 нм. Малый размер нано частиц позволяет им легко входить в контактную поверхность для несения нагрузки и смазки.

На рисунке 3 показаны основные трибологические характеристики наночастиц: коэффициента трения (а), значения максимального снижения трения (б) и максимального снижения износа (в). Согласно результатам, сульфиды показали самый низкий показатель коэффициента трения и самые высокие значения снижения трения и износа.

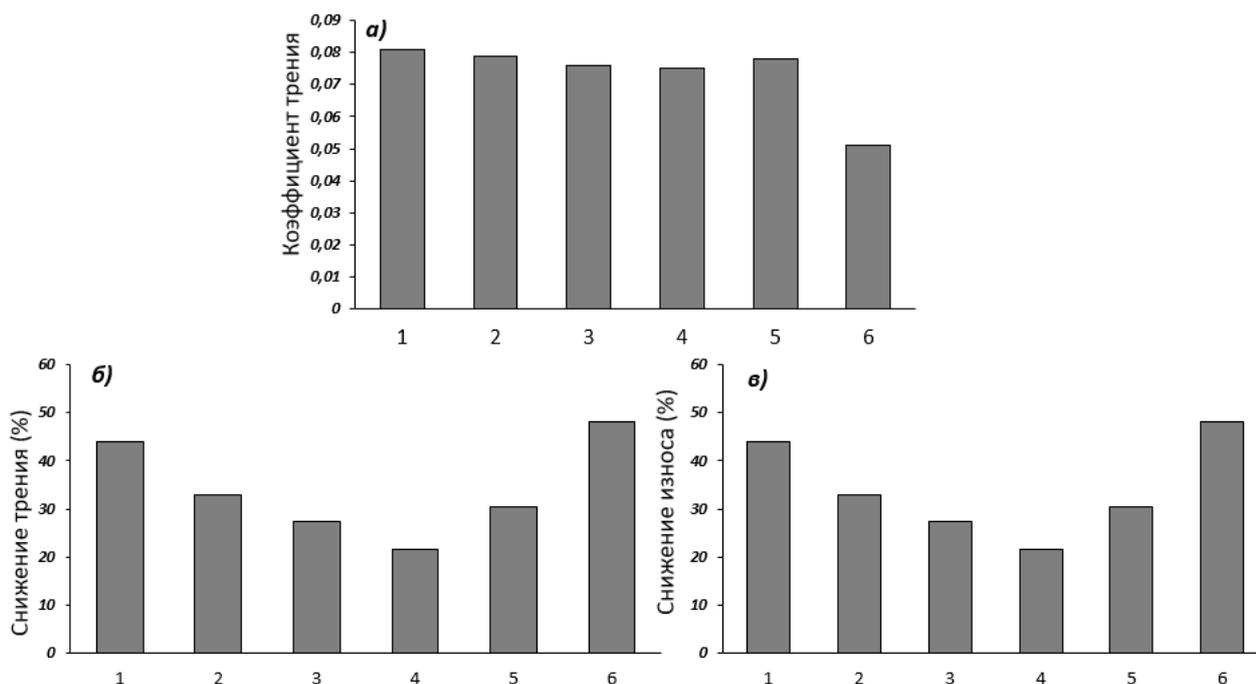


Рисунок 3 – Сравнение трибологических характеристик 1 – углеродных наноматериалов, 2 – композитов, 3 – наночастиц металлов, 4 – оксидов металлов, 5 – редкоземельных металлов, 6 – сульфидов металлов

Таким образом, химический состав nano частиц играет важную роль в противоизносных характеристиках, в то же время оказывая незначительное влияние на характеристики трения. Размер nano частиц показал видимое влияние как на трение, так и на износ. Оптимизация размеров определялась конкретными условиями работы и режимами смазки. Морфология nano частиц играет решающую роль в снижении трения, в то же время оказывая незначительное влияние на противоизносные характеристики. Исходя из триботехнических характеристик возможно применение смазочных материалов с добавлением данных наполнителей в автомобильном транспорте

4 Заключение

Смазочные материалы на растительной основе кажутся многообещающими альтернативами для замены нефтяных смазочных материалов в ближайшие годы, учитывая существенное изменение методов химической модификации и объединение передовых наночастиц. Смазки на основе растительных масел имеют различные области применения, связанные с промышленными и автомобильными секторами, благодаря присущим им свойствам. Данные материалы находят широкий спектр применения благодаря своей способности к биологическому разложению, меньшей токсичности и экологической устойчивости (масло для бензопил, буровые растворы, авиационные реактивные двигатели, трансформаторное масло). Свойства биосмазочных материалов в первую очередь зависят от атомной и молекулярной структуры, их связи и взаимодействия, которые напрямую влияют на характеристики трения и износа, летучесть и диапазон рабочих температур. Однако, в условиях работы с ударными нагрузками при высоких скоростях и температурой ни биологические ни нефтяные смазочные материалы не могут обеспечить достаточную защиту от износа у трущихся поверхностей. В связи с этим в смазочные материалы необходимо добавление присадок. Наночастицы являются подходящими химическими добавками для улучшения физико-химических свойств масла.

Список литературы

- 1 Yelchuri V., Azmeera T., Karuna M. S. L. Metathesized castor oil acylated derivatives: lubricants base stocks with low pour points and superior anti-wear properties //SN Applied Sciences. – 2019. – Т. 1. – №. 10. – С. 1214.
- 2 Zulkifli N. W. M. et al. Lubricity of bio-based lubricant derived from different chemically modified fatty acid methyl ester //Tribology International. – 2016. – Т. 93. – С. 555-562.
- 3 Sharma U. C., Sachan S. Friction and wear behavior of karanja oil derived biolubricant base oil //SN Applied Sciences. – 2019. – Т. 1. – С. 1-11.
- 4 Borda F. L. G. et al. Experimental investigation of the tribological behavior of lubricants with additive containing copper nanoparticles //Tribology International. – 2018. – Т. 117. – С. 52-58.
- 5 Bellini M. et al. Vegetable oils as Triple Bottom Line compliant lubricants //Tribology International. – 2021. – Т. 161. – С. 107103.
- 6 Schneider M. P. Plant-oil-based lubricants and hydraulic fluids //Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2006. – Т. 86. – №. 12. – С. 1769-1780.
- 7 Hajar M., Vahabzadeh F. Biolubricant production from castor oil in a magnetically stabilized fluidized bed reactor using lipase immobilized on Fe₃O₄ nanoparticles //Industrial Crops and Products. – 2016. – Т. 94. – С. 544-556.
- 8 Joseph P. V., Sharma D. K. Improvement of thermooxidative stability of non-edible vegetable oils of Indian origin for biodegradable lubricant application //Lubrication Science. – 2010. – Т. 22. – №. 4. – С. 149-161.
- 9 Kržan B., Vižintin J. Tribological properties of an environmentally adopted universal tractor transmission oil based on vegetable oil //Tribology International. – 2003. – Т. 36. – №. 11. – С. 827-833.
- 10 Reeves C. J. et al. The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants //Tribology International. – 2015. – Т. 90. – С. 123-134.
- 11 Salimon J., Salih N., Abdullah B. M. Diesters biolubricant base oil: synthesis, optimization, characterization, and physicochemical characteristics //International Journal of Chemical Engineering. – 2012. – Т. 2012.
- 12 Aravind A., Prabhakaran Nair K., Joy M. L. Formulation of a novel biolubricant with enhanced properties using esterified rubber seed oil as a base stock //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2018. – Т. 232. – №. 12. – С. 1514-1524.
- 13 Syahrullail S., Kamitani S., Shakirin A. Performance of vegetable oil as lubricant in extreme pressure condition //Procedia Engineering. – 2013. – Т. 68. – С. 172-177.
- 14 Ruggiero A. et al. Tribological characterization of vegetal lubricants: Comparative experimental investigation on *Jatropha curcas* L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil //Tribology International. – 2017. – Т. 109. – С. 529-540.
- 15 Salih N., Salimon J. A review on eco-friendly green biolubricants from renewable and sustainable plant oil sources //Biointerface Res. Appl. Chem. – 2021. – Т. 11. – №. 5. – С. 13303-13327.
- 16 Kotturu C. M. V. V. et al. Investigation of tribological properties and engine performance of polyol ester-based bio-lubricant: Commercial motorbike engine oil blends //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2020. – Т. 234. – №. 5. – С. 1304-1317.
- 17 Georgescu C., Solea L. C., Deleanu L. The influence of degumming process on tribological behaviour of soybean oil //Tribology in Industry. – 2015. – Т. 37. – №. 3. – С. 330.
- 18 Georgescu C., Solea L. C., Deleanu L. The influence of degumming process on tribological behaviour of soybean oil //Tribology in Industry. – 2015. – Т. 37. – №. 3. – С. 330.
- 19 Shahabuddin M. et al. Study on the friction and wear characteristics of bio-lubricant synthesized from second generation *jatropha* methyl ester //Tribology in Industry. – 2020.
- 20 Sneha E. et al. Formulation of bio-lubricant based on modified rice bran oil with stearic acid as an anti-wear additive //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2021. – Т. 235. – №. 9. – С. 1950-1957.

- 21 Cheah M. Y. et al. Physicochemical and tribological properties of microalgae oil as bio-lubricant for hydrogen-powered engine //International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Т. 45. – №. 42. – С. 22364-22381.
- 22 Khemchandani B. et al. Mixture of safflower oil and synthetic ester as a base stock for biodegradable lubricants //Lubrication Science. – 2014. – Т. 26. – №. 2. – С. 67-80.
- 23 Chan C. H. et al. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Т. 93. – С. 145-157.
- 24 Deepika S. Nanotechnology implications for high performance lubricants //SN Appl. Sci. – 2020. – Т. 2. – С. 1128.
- 25 Talukdar S., Ghosh P. Biodegradable vegetable oil polymer as a multifunctional lubricating oil additive //Journal of Macromolecular Science, Part A. – 2020. – Т. 57. – №. 4. – С. 244-249.
- 26 Ghosh P. et al. Multifunctional biodegradable lube oil additives: Synthesis, characterization, and performance evaluation //Petroleum Science and Technology. – 2017. – Т. 35. – №. 1. – С. 66-71.
- 27 Ghosh P., Das M. Biocompatible multifunctional lubricating oil additives //Petroleum Science and Technology. – 2016. – Т. 34. – №. 15. – С. 1367-1373.
- 28 Xiao H. et al. Amine-intercalated α -zirconium phosphates as lubricant additives //Applied Surface Science. – 2015. – Т. 329. – С. 384-389.
- 29 Alves S. M. et al. Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions //Tribology international. – 2013. – Т. 65. – С. 28-36.
- 30 Bekal S., Bhat N. R. Bio-lubricant as an alternative to mineral oil for a CI engine—an experimental investigation with pongamia oil as a lubricant //Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2012. – Т. 34. – №. 11. – С. 1016-1026.
- 31 Azman N. F. et al. The anti-wear and extreme pressure performance of CuO and graphite nanoparticles as an additive in palm oil //International Journal of Structural Integrity. – 2019. – Т. 10. – №. 5. – С. 714-725.
- 32 Singh Y. et al. Sustainability of a non-edible vegetable oil based bio-lubricant for automotive applications: A review //Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – Т. 111. – С. 701-713.
- 33 Dai W. et al. Roles of nanoparticles in oil lubrication //Tribology International. – 2016. – Т. 102. – С. 88-98.
- 34 Sui T. et al. Effect of particle size and ligand on the tribological properties of amino functionalized hairy silica nanoparticles as an additive to polyalphaolefin //Journal of Nanomaterials. – 2015. – Т. 16. – №. 1. – С. 427-427.
- 35 Azman S. S. N. et al. Study of tribological properties of lubricating oil blend added with graphene nanoplatelets //Journal of Materials Research. – 2016. – Т. 31. – №. 13. – С. 1932-1938.
- 36 Luo T. et al. Tribology properties of Al₂O₃/TiO₂ nanocomposites as lubricant additives //Ceramics International. – 2014. – Т. 40. – №. 7. – С. 10103-10109.
- 37 Roslan S. H., Abd Hamid S. B., Mohd Zulkifli N. W. Synthesis, characterisation and tribological evaluation of surface-capped molybdenum sulphide nanoparticles as efficient antiwear bio-based lubricant additives //Industrial Lubrication and Tribology. – 2017. – Т. 69. – №. 3. – С. 378-386.

References

- 1 Yelchuri V., Azmeera T., Karuna M. S. L. Metathesized castor oil acylated derivatives: lubricants base stocks with low pour points and superior anti-wear properties //SN Applied Sciences. – 2019. – Т. 1. – №. 10. – С. 1214.
- 2 Zulkifli N. W. M. et al. Lubricity of bio-based lubricant derived from different chemically modified fatty acid methyl ester //Tribology International. – 2016. – Т. 93. – С. 555-562.
- 3 Sharma U. C., Sachan S. Friction and wear behavior of karanja oil derived biolubricant base oil //SN Applied Sciences. – 2019. – Т. 1. – С. 1-11.
- 4 Borda F. L. G. et al. Experimental investigation of the tribological behavior of lubricants with additive containing copper nanoparticles //Tribology International. – 2018. – Т. 117. – С. 52-58.

- 5 Bellini M. et al. Vegetable oils as Triple Bottom Line compliant lubricants //Tribology International. – 2021. – Т. 161. – С. 107103.
- 6 Schneider M. P. Plant-oil-based lubricants and hydraulic fluids //Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2006. – Т. 86. – №. 12. – С. 1769-1780.
- 7 Hajar M., Vahabzadeh F. Biolubricant production from castor oil in a magnetically stabilized fluidized bed reactor using lipase immobilized on Fe₃O₄ nanoparticles //Industrial Crops and Products. – 2016. – Т. 94. – С. 544-556.
- 8 Joseph P. V., Sharma D. K. Improvement of thermooxidative stability of non-edible vegetable oils of Indian origin for biodegradable lubricant application //Lubrication Science. – 2010. – Т. 22. – №. 4. – С. 149-161.
- 9 Kržan B., Vižintin J. Tribological properties of an environmentally adopted universal tractor transmission oil based on vegetable oil //Tribology International. – 2003. – Т. 36. – №. 11. – С. 827-833.
- 10 Reeves C. J. et al. The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants //Tribology International. – 2015. – Т. 90. – С. 123-134.
- 11 Salimon J., Salih N., Abdullah B. M. Diesters biolubricant base oil: synthesis, optimization, characterization, and physicochemical characteristics //International Journal of Chemical Engineering. – 2012. – Т. 2012.
- 12 Aravind A., Prabhakaran Nair K., Joy M. L. Formulation of a novel biolubricant with enhanced properties using esterified rubber seed oil as a base stock //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2018. – Т. 232. – №. 12. – С. 1514-1524.
- 13 Syahrullail S., Kamitani S., Shakirin A. Performance of vegetable oil as lubricant in extreme pressure condition //Procedia Engineering. – 2013. – Т. 68. – С. 172-177.
- 14 Ruggiero A. et al. Tribological characterization of vegetal lubricants: Comparative experimental investigation on Jatropha curcas L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil //Tribology International. – 2017. – Т. 109. – С. 529-540.
- 15 Salih N., Salimon J. A review on eco-friendly green biolubricants from renewable and sustainable plant oil sources //Biointerface Res. Appl. Chem. – 2021. – Т. 11. – №. 5. – С. 13303-13327.
- 16 Kotturu C. M. V. V. et al. Investigation of tribological properties and engine performance of polyol ester-based bio-lubricant: Commercial motorbike engine oil blends //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2020. – Т. 234. – №. 5. – С. 1304-1317.
- 17 Georgescu C., Solea L. C., Deleanu L. The influence of degumming process on tribological behaviour of soybean oil //Tribology in Industry. – 2015. – Т. 37. – №. 3. – С. 330.
- 18 Georgescu C., Solea L. C., Deleanu L. The influence of degumming process on tribological behaviour of soybean oil //Tribology in Industry. – 2015. – Т. 37. – №. 3. – С. 330.
- 19 Shahabuddin M. et al. Study on the friction and wear characteristics of bio-lubricant synthesized from second generation jatropha methyl ester //Tribology in Industry. – 2020.
- 20 Sneha E. et al. Formulation of bio-lubricant based on modified rice bran oil with stearic acid as an anti-wear additive //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2021. – Т. 235. – №. 9. – С. 1950-1957.
- 21 Cheah M. Y. et al. Physicochemical and tribological properties of microalgae oil as biolubricant for hydrogen-powered engine //International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Т. 45. – №. 42. – С. 22364-22381.
- 22 Khemchandani B. et al. Mixture of safflower oil and synthetic ester as a base stock for biodegradable lubricants //Lubrication Science. – 2014. – Т. 26. – №. 2. – С. 67-80.
- 23 Chan C. H. et al. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Т. 93. – С. 145-157.
- 24 Deepika S. Nanotechnology implications for high performance lubricants //SN Appl. Sci. – 2020. – Т. 2. – С. 1128.
- 25 Talukdar S., Ghosh P. Biodegradable vegetable oil polymer as a multifunctional lubricating oil additive //Journal of Macromolecular Science, Part A. – 2020. – Т. 57. – №. 4. – С. 244-249.

- 26 Ghosh P. et al. Multifunctional biodegradable lube oil additives: Synthesis, characterization, and performance evaluation //Petroleum Science and Technology. – 2017. – Т. 35. – №. 1. – С. 66-71.
- 27 Ghosh P., Das M. Biocompatible multifunctional lubricating oil additives //Petroleum Science and Technology. – 2016. – Т. 34. – №. 15. – С. 1367-1373.
- 28 Xiao H. et al. Amine-intercalated α -zirconium phosphates as lubricant additives //Applied Surface Science. – 2015. – Т. 329. – С. 384-389.
- 29 Alves S. M. et al. Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions //Tribology international. – 2013. – Т. 65. – С. 28-36.
- 30 Bekal S., Bhat N. R. Bio-lubricant as an alternative to mineral oil for a CI engine—an experimental investigation with pongamia oil as a lubricant //Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2012. – Т. 34. – №. 11. – С. 1016-1026.
- 31 Azman N. F. et al. The anti-wear and extreme pressure performance of CuO and graphite nanoparticles as an additive in palm oil //International Journal of Structural Integrity. – 2019. – Т. 10. – №. 5. – С. 714-725.
- 32 Singh Y. et al. Sustainability of a non-edible vegetable oil based bio-lubricant for automotive applications: A review //Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – Т. 111. – С. 701-713.
- 33 Dai W. et al. Roles of nanoparticles in oil lubrication //Tribology International. – 2016. – Т. 102. – С. 88-98.
- 34 Sui T. et al. Effect of particle size and ligand on the tribological properties of amino functionalized hairy silica nanoparticles as an additive to polyalphaolefin //Journal of Nanomaterials. – 2015. – Т. 16. – №. 1. – С. 427-427.
- 35 Azman S. S. N. et al. Study of tribological properties of lubricating oil blend added with graphene nanoplatelets //Journal of Materials Research. – 2016. – Т. 31. – №. 13. – С. 1932-1938.
- 36 Luo T. et al. Tribology properties of Al₂O₃/TiO₂ nanocomposites as lubricant additives //Ceramics International. – 2014. – Т. 40. – №. 7. – С. 10103-10109.
- 37 Roslan S. H., Abd Hamid S. B., Mohd Zulkifli N. W. Synthesis, characterisation and tribological evaluation of surface-capped molybdenum sulphide nanoparticles as efficient antiwear bio-based lubricant additives //Industrial Lubrication and Tribology. – 2017. – Т. 69. – №. 3. – С. 378-386.

© Медведев И.Н., Савченко С.И., Жужукин К.В., Жужукин Н.В., 2023