
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.89.012.2

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ
СИНТЕТИЧЕСКИХ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**© 2024 г. Б. П. Трофименко^{1, *}, А. В. Маркелов¹*¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия***e-mail: bog6741@yandex.ru*

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.

После доработки 12.02.2024 г.

Принята к публикации 19.02.2024 г.

Настоящая статья рассматривает возможность применение смазочных материалов на водной основе в подшипниках. В статье представлен обзор различных типов водных смазок, их состава и свойств, а также методов их применения в подшипниках. Особое внимание уделено исследованиям, показывающим эффективность водных смазок в снижении трения, износа и повышении энергоэффективности подшипников. Результаты исследований подтверждают потенциал водных смазок для применения в различных промышленных секторах, где требуется высокая производительность и снижение воздействия на окружающую среду. Эта статья предоставляет ценную информацию для инженеров и производителей, которые стремятся улучшить работу подшипников и снизить негативное влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: Подшипники, пары трения, уравнение Рейнольдса, коэффициент загрузки, температуры, слои смазочного материала, температуру рабочей поверхности, вязкость воды

DOI: 10.31857/S0235711924030085, **EDN:** PGZHUO

Износ является распространенной проблемой в технической эксплуатации автомобилей. Он может оказывать значительное влияние на работоспособность и безопасность транспортного средства.

Одним из основных направлений влияния на процесс изнашивания является правильный выбор смазочных материалов. Кроме этого, смазки способствуют повышению эффективности и экономичности. Например, с использованием смазки с низким трением можно уменьшить энергозатраты на трение и улучшить показатели топливной экономичности [1].

Регулярная замена смазочных материалов при техническом обслуживании позволяет поддерживать автомобиль в технически исправном состоянии.

Смазочные материалы на нефтяной основе могут иметь некоторые проблемы, которые следует учитывать: некоторые смазочные материалы на нефтяной основе могут иметь высокую вязкость при низких температурах, что затрудняет их подачу и смазку в холодных условиях, что может привести к повышенному трению и износу деталей при пуске холодного двигателя или после длительного простоя [1, 2]; нефтяные смазочные материалы могут подвергаться окислению под воздействием высоких температур и кислорода, что приводит к образованию шламов, шлаков, асфальтенов,

оксикислот и других продуктов деструкции масел, которые могут забивать поры и каналы, снижая эффективность смазки и увеличивая износ [3, 4].

Однако современные технологии позволяют производить смазочные материалы на нефтяной основе с улучшенными свойствами и стабильностью. Кроме того, разработаны также синтетические и полусинтетические смазочные материалы, которые обладают более высокой стабильностью и лучшими смазочными свойствами в широком диапазоне температур [5, 6].

В настоящее время осуществляется разработка альтернативных безнефтяных смазочных материалов на растительной и водной основе для применения в различных отраслях, включая транспорт, промышленность и пищевую индустрию [7].

Безнефтяные смазочные материалы имеют ряд преимуществ [8]: 1) более экологически чистые; 2) более низкий коэффициент трения; 3) более высокая термической стабильность; 4) более широкий диапазон рабочих температур.

Однако безнефтяные смазочные материалы также могут иметь свои ограничения: более низкая смазывающая способность в сравнении с нефтяными смазками, возможность коррозии металлических поверхностей. Поэтому перед использованием таких материалов необходимо тщательно изучить их свойства и соответствие требованиям конкретного применения.

Смазочные материалы на водной основе являются новым направлением в разработке средств для транспорта. Это связано с тем, что они обладают рядом преимуществ перед традиционными масляными смазками, такими как экологическая безопасность и более низкий коэффициент трения.

История разработки смазочных материалов на водной основе начинается в середине 20 века [9]. В то время, когда наибольшее внимание уделялось разработке масляных смазок. Однако уже тогда были известны преимущества водных смазок: их экологическая безопасность и возможность использование в условиях низких температур.

Методы разработки смазочных материалов на водной основе включают в себя использование различных типов добавок и компонентов. Одним из наиболее распространенных веществ является полиакриламид, который используется для улучшения вязкости и снижения трения. Кроме того, могут применяться и другие добавки, например, полиакрилонитрил, полисилоксаны и другие полимеры [10].

Разработка смазочных материалов на водной основе для транспортной отрасли имеет большое значение для экологии и экономики. Они позволяют снизить вредное воздействие на окружающую среду и увеличить срок службы узлов и агрегатов. Кроме того, их можно использовать в условиях низких температур, что делает такие смазки более универсальными и экономичными в использовании [11].

Поэтому разработка экологически чистых смазочных композиций на водной основе для транспортной отрасли имеет большое значение. Их применение позволяет снизить вредное воздействие на окружающую среду и увеличить срок службы оборудования.

Классификация смазочных композиций на водной основе. Водные смазки обычно классифицируются на несколько типов в зависимости от их состава и свойств [12]: 1) гидродинамические смазки. Эти смазки состоят из воды или водно-гликольных растворов и добавок, таких как присадки или полимеры. Они предназначены для использования в системах, где требуется эффективное снижение трения и износа, например, в гидродинамических подшипниках или гидравлических системах [13–15]; 2) смазки на основе полиалкиленгликолей (PAG). Эти смазки содержат полиалкиленгликоли, которые обладают отличными смазывающими свойствами и высокой термической стабильностью. Они широко применяются в компрессорах, где требуется высокая производительность при высоких температурах [16, 17];

3) биоразлагаемые смазки. Эти смазки разлагаются в окружающей среде и имеют низкую токсичность. Они часто используются в приложениях, связанных с экологическими требованиями, таких как смазка водных систем или гидравлических систем в морской среде [18]; 4) полиэфирные смазки. Эти смазки содержат полиэфирные масла и обладают отличными свойствами смазки при высоких температурах. Они часто применяются в высокотемпературных приложениях, таких как печи или горелки [19].

Гидродинамические смазки на водной основе представляют собой особый вид смазочных материалов, разработанных для использования в подшипниках. Они отличаются от традиционных масляных смазок тем, что вместо минеральных или синтетических масел в их составе присутствует вода [1].

Гидродинамические смазки на водной основе обладают рядом преимуществ. Во-первых, они экологически безопасны и не содержат вредных химических веществ. Это особенно важно в случае применения в секторах, где требуются высокие стандарты экологической безопасности.

Во-вторых, вода в составе смазки обладает отличными свойствами охлаждения, что позволяет поддерживать низкую температуру в подшипниках при высоких нагрузках и скоростях. Это способствует предотвращению перегрева и повреждения подшипников.

Третье преимущество гидродинамических смазок на водной основе заключается в их высокой стабильности и устойчивости к окислению. Они способны образовывать прочную пленку на поверхностях подшипников, что снижает истирание и увеличивает срок службы подшипников.

Несмотря на свои преимущества, гидродинамические смазки на водной основе имеют и некоторые ограничения. Они могут быть менее эффективными при работе в условиях высоких нагрузок и экстремальных температур [20]. Также необходимо учитывать, что вода может вызывать коррозию металлических поверхностей, поэтому важно правильно подобрать материалы и дополнительные антикоррозионные добавки при использовании таких смазок [1].

Анализ технических характеристик смазочных композиций на водной основе. В целом, гидродинамические смазки на водной основе представляют собой инновационное решение, которое сочетает в себе преимущества воды и смазочных свойств. Они могут быть полезны в некоторых приложениях, но требуют тщательного анализа и учета специфических условий эксплуатации подшипников.

При повышении скорости скольжения в подшипниках интенсивно растут механические потери от трения и возникают серьезные затруднения для сохранения допустимого температурного уровня работы сопряженных пар трения [21].

Научные основы условий, обеспечивающих надежную и длительную работ; пары трения подшипника, базируются на теории гидродинамической смазки. Основным уравнением, отражающим процессы, приводящие к развитию несущей способности слоя смазочного материала в условиях гидродинамики, является уравнение Рейнольдса [13]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} - \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} - \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6v \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1)$$

где x и z — координаты поверхности; h — толщина слоя смазочного материала; p — давление в несущем слое смазочного материала; η — коэффициент динамической вязкости; v — скорость скольжения.

В соответствии с теорией гидродинамической смазки для обеспечения надежной работы пары трения следует выполнить два требования: 1) обеспечить наличие слоя

смазочного материала, разделяющего сопряженные рабочие поверхности, имеющего достаточную толщину, превышающую суммарную высоту микронеровностей вала и вкладыша даже при самых тяжелых режимах эксплуатации; 2) не превышать температуру рабочей поверхности сверх заданного значения [12].

Процессы, возникающие в несущем слое смазочного материала опоры, весьма сложны. Они зависят от большого числа взаимодействующих факторов: конструктивных, технологических, монтажных и эксплуатационных (в последнем факторе необходимо учитывать неравномерность температурного поля с изменением скорости скольжения и нагрузки, а также возможность значительного загрязнения смазочного материала) [13].

Точность и надежность расчета несущей способности смазочного материала в условиях гидродинамики зависят от учета комплекса указанных выше факторов, находящихся в сложной взаимосвязи. Теория гидродинамической смазки позволяет найти параметры, характеризующие развитие в подшипнике рабочего процесса, учитывающие несколько влияющих факторов, что очень важно для анализа этой многофункциональной зависимости [22].

Одним из таких параметров является коэффициент нагруженности подшипника [13]

$$\phi = \frac{P_a}{\omega \eta_{cp}} \left(\frac{\Delta}{d} \right)^2, \quad (2)$$

где P_a — средняя удельная нагрузка; ω — угловая скорость; η_{cp} — коэффициент динамической вязкости, взятый по средней температуре слоя; Δ — динамический зазор подшипника; d — диаметр подшипника [13].

С коэффициентом нагруженности необходимо связать эксцентриситет расположения центра вращающегося элемента пары в зазоре χ в виде функции $\chi/(1 - \chi)$ и дать графики (рис. 1), удобные для практического применения [23].

Решение уравнения Рейнольдса (1) выполнено применительно к неизотермическому рабочему процессу в подшипнике с нахождением расчетных коэффициентов, а также получены оптимальные соотношения конструктивных и эксплуатационных элементов и графики, полезные для конструктора.

При высокой скорости скольжения в подшипнике особенно важным является обеспечение интенсивного отведения тепла при трении и возможно малая сила трения как в нормальных, так и в тяжелых режимах работы. Отмеченные обстоятельства показали преимущества применения воды в качестве смазочного материала подшипников высокоскоростных валов, так как теплоемкость воды в 2.5 раза больше теплоемкости минерального масла. Очень высока скрытая теплота парообразования, что существенно облегчает задачу отведения выделяемого при трении тепла от подшипника.

Вязкость воды приблизительно в 50 раз меньше вязкости минерального масла, что в условиях гидродинамики значительно снижает трение. Однако малая вязкость воды затрудняет создание достаточной для всех условий эксплуатации толщины слоя смазочного материала, разделяющего рабочие поверхности, и требует разработки специальной «конструкции подшипника, а также тщательности изготовления подшипников и применения антифрикционных пар трения.

Применение воды в качестве смазочного материала требует обеспечения устойчивости материалов к коррозии. При конструировании подшипников, смазываемых водой, следует учитывать вредное действие загрязнений, которые могут попасть в смазочный материал и ухудшить гидродинамический эффект трения [24].

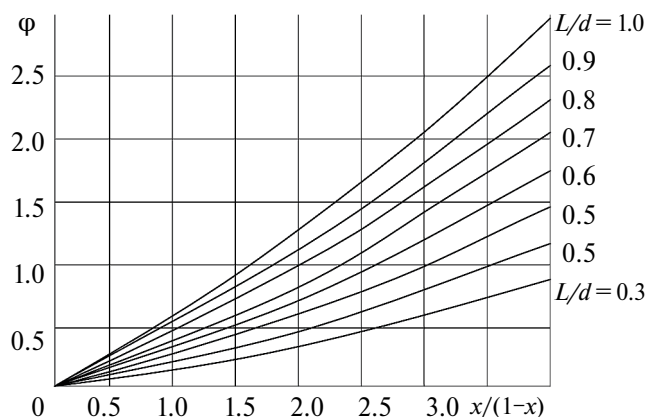


Рис. 1. Зависимость коэффициента нагруженности подшипника ϕ от функции $\chi(1 - \chi)$, характеризующей эксцентриситет расположения центра вращающегося элемента пары при различных соотношениях L/d (L — длина подшипника, d — диаметр) [13].

Основная задача конструктора — обеспечение немедленной после пуска машин реализации гидродинамического трения в подшипниках, которое в дальнейшем должно существовать при всех возможных перегрузках и ужесточениях режима эксплуатации. Нельзя допускать наличия на рабочих поверхностях участков перегрева — горячих зон, которые показывают несовершенство гидродинамического процесса [25].

При соблюдении этих требований в подшипниках питательных конденсатных насосов, устанавливаемых на теплоэлектроцентралях, обеспечивается длительный срок службы подшипников: более 50000 ч при смазывании водой. Такой срок службы может быть обеспечен при определенных значениях интенсивности линейного изнашивания неподвижной втулки, размещенной в картере ($I_h = 1.24 \cdot 10^{-13}$), и втулки (рубашки), посаженной на вращающийся вал ($I_h = 2.7 \cdot 10^{-13}$). Подобный высокий срок службы подшипников достигнут при соблюдении требований теории гидродинамической смазки и в других отраслях промышленности [13].

Аналитические и экспериментальные исследования показали возможность длительной работы подшипников при высоких удельных нагрузках при смазывании водой (пресной и морской) и минеральными маслами; обеспечения кратковременного температурного — барьера ($\sim 340^\circ\text{C}$), для длительной работы рекомендуется предельная температура 260°C ; исключения схватывания пары трения со сталью даже при температуре около 400°C ; получения коэффициента трения при трогании с места под высокой нагрузкой (начало движения) 0.05–0.06, что в 2.5 раза меньше, чем у баббита. [26].

Рекомендации, основанные на комплексе исследований, подтвержденных проверкой в натурных условиях, внедряются в промышленность в целях повышения качества работы, увеличения срока службы, экономии материалов и компактности изделий. Для кратковременной работы значения удельных нагрузок (табл. 1), можно увеличить в 2 раза [13].

Выводы. Смазочные материалы на водной основе могли бы стать экологически чистой альтернативой смазочным материалам на нефтяной основе. Использование присадок к смазочным материалам на водной основе вызывает все больший интерес у ученых и инженеров не только из-за потенциальной экологичности, но

Таблица 1. Допустимые удельные нагрузки (МПа) и скорости скольжения (м/с) для подшипников из материала С-1-У[13]

Смазочный материал	Подшипник	
	радиальный	упорный
Вода	6/70	8/70
Минеральное масло	8/60	9/60

*Примечание: В числителе приведены значения удельных нагрузок, в знаменателе — скоростей скольжения.

и потому, что существует потенциал для создания жидкой смазки многократного использования.

Дальнейшее изучение использования и разработка присадок также позволяют создавать смазочные материалы, которые можно использовать для различных целей. Добавки могут изменять свойства и поведение смазочного материала, в результате чего получают высокоэффективные жидкие смазочные материалы, предназначенные для конкретных трибосистем. Свойства включают более высокую вязкость и плотность для улучшения тепловых характеристик, и создания более толстых пленок жидкости внутри смазочного материала.

Жидкие смазочные материалы на водной основе также обладают улучшенными характеристиками трения, износа и коррозии. Атомная структура смазочного материала меняется в зависимости от типа используемой присадки. Ионные жидкости, биодобавки, нанодобавка на основе титана, сульфонат на основе водорастворимого каучукового масла, наночастицы на основе графена и наноструктурированные бораты — все это потенциальные добавки, которые можно использовать с жидкими смазочными материалами на водной основе для улучшения поведения и свойств смазки [27].

Потенциальная проблема для смазочных материалов на водной основе заключается в том, что спрос и возможности производства со временем будут увеличиваться по мере того, как добавки, используемые для жидких смазочных материалов на водной основе, станут жизнеспособным вариантом. Текущие исследования сосредоточены на продвижении и разработке добавок. Поэтому важно продолжать исследования и разработки присадок, используемых в сочетании с жидкими смазочными материалами на водной основе. Это еще больше расширит использование смазочных материалов на водной основе по сравнению со смазочными материалами на нефтяной основе в качестве экологически чистой альтернативы.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Ярославского государственного технического университета. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеевский Р. М., Лаших В. Л., Буяновский И. А., и др. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 244 с.
2. Сырбаков А. П., Корчуганова М. А. Топливо и смазочные материалы: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 159 с.

3. *Виленкин А. В.* Масла для шестерённых передач. М.: Химия, 1982. 248 с.
4. *Кламманн Д.* Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / Пер. с англ. / Под ред. Ю. С. Заславского. М.: Химия, 1988. 488 с.
5. *Сафонов А. С., Ушаков А. И., Гришин В. В.* Химотология горюче-смазочных материалов. СПб.: НПКИЦ, 2007. 488 с.
6. *Синельников А. Ф., Балабанов В. И.* Автомобильные масла. Краткий справочник. М.: Книжное издательство «За рулем», 2005.
7. *Стрельцов В. В., Стребков С. В.* Тенденции использования биологических смазочных материалов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. № 2.
8. *Облащикова И. Р.* Исследование рапсового масла в качестве основы альтернативных смазочных материалов: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2004. 32 с.
9. *Rahman H., Warneke H., Webbert H., Rodriguez J., Austin E., Tokunaga K., Rajak D., Menezes P.* Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances // *Lubricants* 2021. V. 9 (8). P. 73.
<https://doi.org/10.3390/lubricants9080073>
10. *Trajkovski A., Novak N., Pustavrh J., Kalin M., Majdic F.* Performance of Polymer Composites Lubricated with Glycerol and Water as Green Lubricants // *Applied sciences*. 2023. V. 13 (13). P. 7413.
<https://doi.org/10.3390/app13137413>
11. *Shah R., Woydt M., Zhang. S.* The Economic and Environmental Significance of Sustainable Lubricants // *Lubricants*. 2021. V. 9 (2). P. 21.
<https://doi.org/10.3390/lubricants9020021>
12. *Старосельский А. А., Гаркунов Д. Н.* Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 385 с.
13. *Мельникова В. А., Северцева Н. А.* Методы подбора в надежности. Т. 4. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
14. *Burstein L.* Lubrication and Roughness // In book *Tribology for Engineers* / Ed. J. P. Davim, 2011. P. 65.
<https://doi.org/10.1533/9780857091444.65>
15. *Aldelbary A., Chang L.* Lubrication and surface engineering // *Principles of Engineering Tribology*. 2023. P. 295.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99115-5.00012-8>
16. *Zhang C.* Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites // *Advances in Ceramic Matrix Composites*. 2014. P. 312.
<https://doi.org/10.1533/9780857098825.2.312>
17. *Senatore A., Pisaturo M., Guida D.* Polyalkylene Glycol Based Lubricants and Tribological Behaviour: Role of Ionic Liquids and Graphene Oxide as Additives // *J. of Nanoscience and Nanotechnology*. 2018. V. 18 (2). P. 913.
<https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15253>
18. *Поннеканти Н., Савита К.* Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V. 16 (1). P. 764.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.002>
19. *Покровский Г. П.* Топливо, смазочные материалы и охлаждающие жидкости: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Двигатели внутреннего сгорания» и «Автомобили и тракторы» Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 196 с.
20. *Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н.* Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
21. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
22. *Балкин М. В.* Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980. 136 с.

23. *Зозуля В. Д.* Смазки для спеченных смазывающихся подшипников. Киев: Наукова думка, 1976. 190 с.
24. *Заславский Ю. С.* Трибология смазочных материалов М.: Химия, 1991. 240 с.
25. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
26. *Горячева И. Г., Добычин М. Н.* Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
27. *Виноградова И. Э.* Противоизносные присадки к маслам. М.: Химия, 1972. 272 с.