

Научная статья

УДК: 621.89.012.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

EDN: UFRJLB



Check for updates

СМАЗОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ВОДНО-СПИРТОВОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Б.П. Трофименко¹ A.В. Маркелов¹²³, А.С. Корытов¹, Ю.П. Осадчий²

¹ Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

² Ивановский государственный политехнический университет,
г. Иваново, Россия

³ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН
г. Москва, Россия

ответственный автор
bog6741@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Предварительные проведенные исследования показали, что смазочные композиции на водно-спиртовой основе обладают высоким индексом вязкости (более 150 ед.), низким коррозионным воздействием и низкой температурой застывания (ниже 56 °C), что является преимуществом по сравнению с традиционными трансмиссионными маслами. Это особенно важно для закрытых узлов трения дорожно-строительных машин, которые требуют надежной и долговременной смазки для предотвращения износа и продления службы оборудования. Также эти композиции состоят из экологически чистых компонентов, что делает их пригодными в условиях эксплуатации с высокими требованиями по экологии.

Материалы и методы. Найдена область оптимальных концентраций в воде предельных одноатомных спиртов. При максимуме антифрикционных и противоизносных свойств с эффектом максимальной стабилизации структуры воды. Предложен возможный механизм смазочного действия водно-спиртовых растворов с образованием на поверхности трения модифицированных пленок, обладающих противозадирными свойствами.

Результаты. Экспериментальным путем найден предельный одноатомный спирт, раствор которого при определенном соотношении с водой обладает высокими смазочными свойствами. Рассмотрен механизм смазочного действия двойных и тройных систем и определен эффект максимальной стабилизации структуры воды, который вызывает изменение объемных и поверхностно-активных свойств композиции.

Заключение. Исследование является научной работой, посвященной актуальной проблеме замены минеральных масел синтетическими жидкостями путем разработки новых составов смазочных водосодержащих композиций с улучшенными антифрикционными и противоизносными свойствами, в результате чего решение этой проблемы имеет важное значение в деле повышения износостойкости узлов трения коробок передач, червячных редукторов, входящих в состав трансмиссии строительно-дорожных машин, автотранспорта и других транспортно-технологических комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трение, износ, смазочные жидкости, одноатомные спирты, противоизносные свойства, антифрикционные свойства, строительные и дорожные машины

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность канд. техн. наук, ведущему специалисту ПАО «Автодизель» Бойкову Дмитрию Викторовичу за проявленную поддержку по организации проведения исследований физико-химических и трибологических свойств новых смазочных материалов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: экспериментальные исследования проводились с использованием средств гранта «УМНИК» по договору №18366ГУ/2023 от 09.08.2023.

Статья поступила в редакцию 30.08.2025; одобрена после рецензирования 11.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

© Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С., Осадчий Ю.П., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.*

Для цитирования: Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С., Осадчий Ю.П. Смазочные композиции на водно-спиртовой основе для закрытых узлов трения дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. С. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

EDN: UFRJLB

LUBRICANT COMPOSITIONS WITH WATER-ALCOHOL BASE FOR CLOSED FRICTION UNITS OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

Bogdan P. Trofimenko¹✉, Aleksandr V. Markelov¹²³, Aleksey S. Korytov¹, Yuriy P. Osadchiy²

¹ Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

² Ivanovo State Polytechnic University,
Ivanovo, Russia

³ A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS
Moscow, Russia

✉ corresponding author
bog6741@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Preliminary conducted studies have shown that water-alcohol based lubricants have a high viscosity index (more than 150 units), low corrosion influence and low pour point (below 56 °C), which is an advantage over traditional transmission oils. This is especially important for enclosed friction units of road construction machines, which require reliable and long-term lubrication to prevent wear and prolong the service life of the equipment. These compositions also consist of environmentally friendly components, that makes them suitable for use in operating conditions with strict environmental requirements.

Materials and methods. The optimal concentration range of saturated monatomic alcohols in water has been found. This range provides maximum antifriction and anti-wear properties with the effect of maximum stabilization of the water structure. A possible way of lubricating action of water-alcohol solutions with the formation of modified layers with extreme pressure properties on the friction surface has been proposed.

Results. The saturated monatomic alcohol has been found experimentally, the solution of which, at a certain ratio with water, has high lubricating properties. The algorithm of the lubricating action of double and triple systems has been considered, and the effect of maximum stabilization of the water structure has been determined, which causes a change in the volumetric and surface-active properties of the composition.

Conclusion. The study refers to the scientific research devoted to the urgent problem of replacing mineral oils with synthetic fluids by developing new compositions of water-containing lubricants with improved antifriction and anti-wear properties, the problem solution is important as it results in increasing the wear resistance of friction units in gearboxes, worm drives, which are part of the transmission of construction and road machines, motor vehicles and other transport and technological complexes.

KEYWORDS: friction, wear, lubricants, monatomic alcohols, anti-wear properties, antifriction properties, construction and road machines

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to Dmitriy Viktorovich Boykov, PhD, a leading specialist at "Avtodiesel", Public Joint Stock Company, for his support in organizing the research of physicochemical and tribological properties of new lubricants.

FINANCING: The experimental studies were conducted using the funds of the "UMNIK" grant under contract No. 18366GU/2023 dated September 8, 2023.

© Trofimenko Bogdan P., Markelov Aleksandr V., Korytov Aleksey S., Osadchiy Yuriy P., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

The article was submitted: August 30, 2025; approved after reviewing: September 11, 2025; accepted for publication: October 21, 2025.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Trofimenko B. P., Markelov A. V., Korytov A. S., Osadchiy Yu. P. Lubricant compositions with water-alcohol base for closed friction units of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (5): 750-758. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

ВВЕДЕНИЕ

Современные строительные-дорожные машины (СДМ) работают в условиях повышенных нагрузок и агрессивных внешних факторов [1], что требует от смазочных материалов высоких эксплуатационных характеристик. Результаты анализа эксплуатируемых СДМ показывают, что в качестве основной причины отказов является преждевременный износ трущихся поверхностей [2]. Общая задача повышения долговечности СДМ в большинстве случаев сводится к увеличению износостойкости отдельных деталей, лимитирующих надежность узлов, систем и всего агрегата в целом.

Известно, что интенсивно используемые зубчатые механизмы подвержены негативным воздействиям ряда факторов. Это и неуставновившийся режим работы, и реверс, и вибрации, и возможность попадания абразивных частиц в зону контакта трущихся поверхностей, и разнообразие внешних условий эксплуатации, вызванное как переменными нагрузками, так и изменениями в окружающей среде, – все это приводит к существенному повышению интенсивности изнашивания трущихся поверхностей деталей машин. Наиболее действенным и эффективным методом борьбы с износом является использование в узлах трения качественных смазочных материалов [3, 4].

В последние годы наблюдается рост интереса к экологически чистым смазочным композициям на водно-спиртовой основе, которые могут предложить ряд преимуществ, таких как улучшенные смазывающие свойства, хорошая теплопроводность и безопасность для окружающей среды [5, 6].

На основании особенностей структуры молекул воды были рассмотрены и предложены различные составы смазочных жидкостей, содержащих предельный одноатомный спирт ряда метанола. Исследования проводились при сравнении смазочных и других эксплуатационных свойств широко применяемых в промышленности минеральных масел, а также известных композиций на водной основе и разработанных жидкостей [7, 8].

Обращается особое внимание на смазочные жидкости на водной основе в связи с тем,

что с наличием у них таких важнейших преимуществ, как хорошие вязкостные свойства, возможность добавлять загустители, весьма высокие вязкостно-температурные свойства, неизменность коррозионного воздействия жидкостей при попадании в них воды извне, хорошая стойкость в этих композициях различных резинотехнических и уплотнительных материалов, простота приготовления смазочных жидкостей, которая заключается в основном лишь во взаимном растворении их компонентов. Немаловажно, что стоимость таких композиционных смесей значительно ниже синтетических композиций [9].

Анализ составов отечественных и зарубежных жидкостей на водной основе показал, что существующие смазочные композиции этого класса состоят из водной основы и загустителя [10]. А улучшение антифрикционных и противоизносных свойств осуществляется на основе добавления присадок [11]. В настоящее время в нашей стране и за рубежом замена минеральных и синтетических масел композициями на водной основе является весьма актуальной проблемой. Это тесно связано с вопросами охраны окружающей среды и экономии нефтепродуктов, так как запасы нефтяного сырья ограничены [12].

Развитие потребности в синтетических смазочных жидкостях привело к созданию смазочных материалов различной природы [13, 14]. Сюда относятся продукты органического синтеза, водно-масляные эмульсии (прямые и обратные), а также различные композиционные немасляные смеси.

Наиболее полно требованиям экологии и охраны окружающей среды отвечают смазочные водосодержащие композиции. К таким жидкостям относятся водно-масляные эмульсии и смеси, не содержащие нефтяные масла. Водно-масляные эмульсии негорючи, нетоксичны, и имеют самую низкую стоимость [15]. Однако время жизни таких эмульсий невелико даже с применением самых современных эмульгаторов – вязкостные и вязкостно-температурные характеристики данных жидкостей очень низкие в большинстве случаев. Кроме того, водно-масляные эмульсии

коррозионно активны и склонны к поражению микрофлорой.

Таким образом, наиболее перспективными на сегодняшний день среди синтетических смазочных жидкостей следует признать смазочные жидкости, не содержащие масла. К ним относятся водно-этиленгликоловые и водно-гликолевые, а также водно-глицериновые среды [16, 17].

К основным преимуществам данных жидкостей следует отнести, во-первых, высокие вязкостно-температурные свойства (индекс вязкости достигает 140–160 и выше), высокую стойкость в этих средах различных резинотехнических уплотнителей и, наконец, неизменность коррозионного воздействия при попадании в них небольших количеств воды извне.

К недостаткам указанных жидкостей можно отнести лишь повышенную испаряемость воды. Однако многолетний опыт эксплуатации показал, что потери воды в год обычно невелики и составляют не более 3–4%.

Такие жидкости обычно состоят из воды, растворенного в воде этиленгликоля или глицерина, а также растворенного в воде загустителя, придающего жидкости необходимые вязкостные свойства. Кроме указанных компонентов, в состав таких жидкостей обычно входит большое количество присадок антифрикционного, противоизносного, антипенного, буферного и других назначений. Таким образом, путь по улучшению смазочных свойств жидкостей за счет введения еще большего количества присадок и компонентов видимо нельзя признать достаточно эффективным. На наш взгляд, существует другой, более эффективный путь улучшения смазочных свойств жидкостей за счет изменения структуры их основы, то есть за счет изменения структуры воды [18]. Согласно современным представлениям о структуре воды, вода представляет собой некоторую ажурную структуру. Между молекулами воды находятся пустоты и кольцевые каналы, которые могут заполняться некоторыми низкомолекулярными углеводородами. Наибольший интерес среди таких низкомолекулярных углеводородов представляет собой предельные одноатомные спирты ряда метанола.

Некоторые из них, в частности, метанол, этиanol, пропанол, изопропанол, имеют в воде неограниченную растворимость.

Целью данной работы является теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования предельных одноатомных и многоатомных

спиртов в их оптимальном соотношении с водой для повышения смазочных свойств водо-содержащих композиций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования были разбиты на два этапа.

На первом этапе проводилось исследование смазочных свойств воды, предельных одноатомных спиртов и их водных растворов при трении металлических поверхностей. Испытаны водные растворы с концентрациями от 5 до 95%.

Для оценки антифрикционных и противоизносных свойств воды и спирта применялась схема трения с переменной площадью контакта и проводилась на серийно выпускаемой, имеющейся в распоряжении в лаборатории ЯГТУ, машине трения СМЦ-2. Данная машина является модификацией машины трения Амслера, предназначена для испытания материалов на износ и определение их фрикционных свойств в условиях трения скольжения и трения качения при нормальных температурах для модельных трибосистем. Допускаемая погрешность измерения момента трения (при проверке в режиме статического нагружения) составляет $\pm 5\%$ от измеряемой величины.

Неподвижный образец в виде диска прижимается к врачающемуся контрольному телу с помощью нагружающего устройства. Схема узла трения представлена на рисунке 1. Коэффициент трения регистрируется индуктивным датчиком и на потенциометре усовершенствованной конструкции.

Глубина износа рассчитывалась по формуле [19]:

$$H = l^2 / 8r , \quad (1)$$

где l – ширина канавки; r – радиус образца.

При испытаниях на износ обычно наблюдается разброс результатов, зависящий как от свойств материалов, так и от методики исследования [10]. Для оценки воспроизводимости результатов экспериментов были проведены серии опытов на образцах из пористого спеченного материала при нагрузке 2,0 МПа, смазке водной композицией, линейной скорости скольжения 0,7 м/с. Материал контролера – сталь 45 (HB-500, шероховатость $R = 0,4$ мкм).

Проведенные исследования позволяют выявить достоинства данной схемы трения с переменной площадью контакта и данную схему можно рекомендовать для оценки противоизносных и антифрикционных свойств различных материалов.

На втором этапе работы исследовали влияние загустителя, так как сама система вода – предельный одноатомный спирт не обладает достаточно высокими вязкостными и вязкостно-температурными свойствами. В экспериментальных исследованиях использовались композиции с концентрацией загустителя в виде глицерина от 30 до 80% масс. и систему вода – изопропанол с массовыми концентрациями в соотношении от 45 до 55% масс. Для оценки антифрикционных и противоизносных свойств трехкомпонентных растворов была разработана методика на базе модернизированной машины СМЦ-2 (рисунок 1).

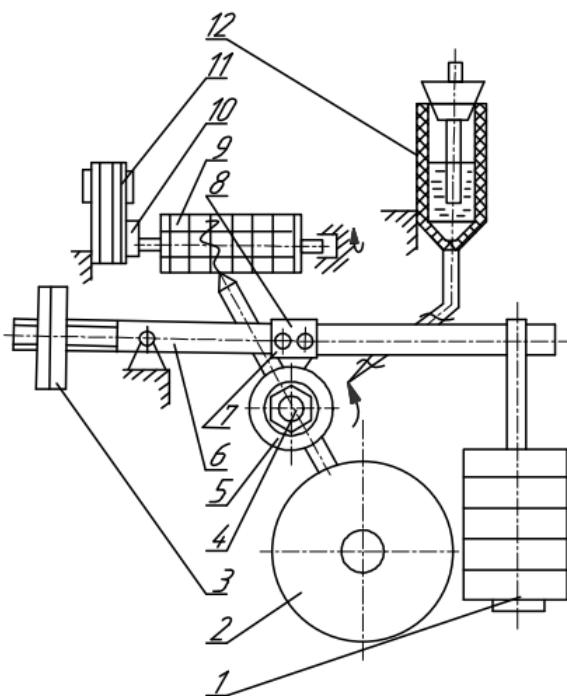


Рисунок 1 – Схема узла трения машины СМЦ-2:
1 – калиброванные гири; 2 – регулятор грузов;
3 – противовес; 4 – вал; 5 – контргантель;
6 – нагрузочный рычаг; 7 – образец;
8 – самоустанавливающаяся державка образца;
9 – барабан; 10 – редуктор; 11 – двигатель;
12 – капельница постоянного расхода
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Friction unit diagram of the “Machine for testing materials for friction and wear”
1 – calibrated weights; 2 – weight regulator;
3 – counterweight; 4 – shaft; 5 – counterweight;
6 – loading lever; 7 – sample;
8 – self-aligning sample holder;
9 – drum; 10 – gearbox; 11 – engine;
12 – constant flow dripper.
Source: compiled by the authors.

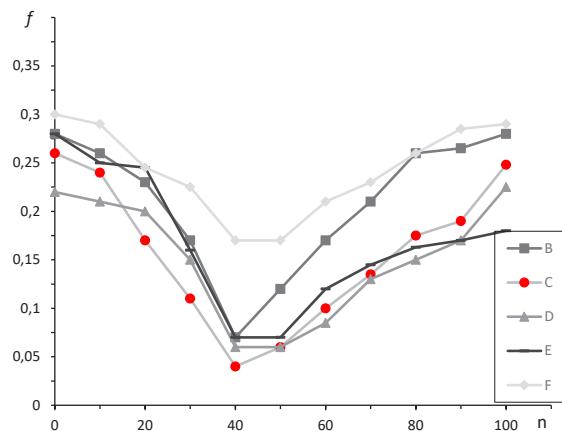


Рисунок 2 – Влияние концентрации водных растворов предельных одноатомных спиртов на коэффициент трения, где F – метанол; E – этиanol; D – пропанол; С – изопропанол; В – бутанол
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Concentration influence of water solutions of saturated monohydric alcohols on the friction coefficient, where: F – methanol; E – ethanol; D – propanol; C – isopropanol; B – butanol.
Source: compiled by the authors.

Измерялись 3 параметра – интенсивность линейного изнашивания, величина коэффициента трения и температуры на выходе смазочной жидкости из зоны трения. Добавляли глицерин 35–65% масс. и смесь изопропанола с водой в соотношении 40–45% масс. и сравнивали с авиационным гидравлическим маслом АМГ-10, гидравлическим маслом СТЕОЛ-М и водно-глицериновым раствором.

Интенсивность линейного изнашивания определялась по формуле

$$l_h = \frac{\Delta h}{\Delta S}, \quad (2)$$

где Δh – величина изнашивания, ΔS – путь.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость коэффициента трения от концентрации от водных растворов предельных одноатомных спиртов показана на рисунке 2.

Результаты показывают, что коэффициент трения при 5% масс. спирта находится в пределах от 0,23 до 0,3, а при 40–45% масс. уже от 0,05 до 0,06 и вновь возрастает при дальнейшем увеличении его концентрации. При малых и больших концентрациях спирта – область граничной смазки, при 40–45% масс. явно выраженная область жидкостного трения. Изменение динамической вязкости растворов спиртов от концентрации изменяется по той же зависимости, что можно объяс-

нить добавлением не электролита и изменением структуры воды. Максимальная вязкость растворов соответствует минимальной интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Результаты дают основание считать, что в данных условиях испытания увеличение концентрации растворов исследуемых спиртов повышает их вязкость, увеличивает долю гидродинамической смазки при трении, обеспечивая снижение износа и коэффициента трения от безразмерного параметра λ по диаграмме Герси-Штрибека.

$$l_h = \frac{\Delta h}{\Delta S}, \quad (3)$$

где μ – вязкость, ω – скорость вращения, P_{cp} – средняя нагрузка.

Такие углеводороды могут попадать в пустоты или кольцевые каналы пространственного каркаса воды и упрочнять этот каркас, т.е. стабилизировать структуру воды. Максимальное заполнение пустот молекулами спирта представляет собой эффект максимальной стабилизации структуры воды, при которой

резко меняются объемные и другие свойства раствора. При этом получаются структуры, обладающие уникальными свойствами.

Объяснить такое поведение спиртовых растворов только изменением вязкости не представляется возможным. Спирты относятся к группе дипольных соединений, они способны адсорбироваться на металле и снижать его свободную поверхностную энергию, уменьшая тем самым работу деформации твердого тела при трении. С увеличением концентрации спирта увеличивается степень адсорбционного пластифицирования поверхностей трения. Продукты механодеструкции спирта образуют на поверхности трения пленки с низким сопротивлением сдвигу. Рентгеноструктурный анализ в среде 45% раствора изопропилового спирта показал наличие на поверхности металла (трения) тончайший пленки окиси железа $z\text{-Fe}_2\text{O}_3$, которая по литературным данным обладает весьма высокими противозадирными свойствами.

Результаты исследований второго этапа приведены в таблице.

Таблица
Сравнительные смазочные характеристики водно-спирто-глицериновых композиций и масел при нагрузке 200 Н
Источник: составлено авторами.

Table
Comparative lubricating characteristics of water-alcohol-glycerin compositions and oils under the load of 200 N, where:
 I_h –intensiveness of the linear wear;
 f_h - friction coefficient at the beginning of the test;
 f_k - friction coefficient at the end of the test;
 $\Delta T, ^\circ C$ – temperature change during the experiment.
Source: compiled by the authors.

Композиция	I_h	f_h	f_k	$\Delta T, ^\circ C$
Масло АМГ-10	3,76	0,13	0,11	68
Стеол М	6,8	0,14	0,05	38
Водно-глицериновая смесь	9,3	0,17	0,07	40
Предлагаемые композиции:				
Композиция № 1	6,2	0,12	0,03	36
Композиция № 2	5,0	0,10	0,02	34
Композиция № 3	6,1	0,12	0,04	39
Композиция № 4	7,2	0,16	0,04	30
Композиция № 5	3,12	0,08	0,01	30

где I_h – интенсивность линейного изнашивания; f_h – коэффициент трения в начале испытания; f_k – коэффициент трения в конце испытания; $\Delta T, ^\circ C$ – изменение температуры в ходе эксперимента.

Введение в изопропиловую смесь с водой глицерина позволило повысить антифрикционные и противоизносные свойства смазочных жидкостей, что объясняется объемными и поверхностными свойствами водно-спиртовой жидкости. Введение в оптимальном соотношении воды, спирта и глицерина существенно повысили смазочные свойства жидкости. Эта система превзошла все сравниваемые виды смазок и даже систему этанол–вода–глицерин, известную под маркой СТЕНОЛ-М¹. Полученная композиция не только не уступает минеральным гидравлическим маслам, но и значительно превосходит их, имея при этом гораздо меньшее число компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошая растворимость в воде делает указанные композиции особенно применимыми в закрытых узлах трения на автотранспорте, текстильных, пищевых и химических отраслях промышленности.

Полная нетоксичность композиции позволяет использовать жидкость сливать в канализацию, не вызывая загрязнения окружающей среды.

Найдена область эффективных концентраций в воде предельных одноатомных спиртов, в которой резко уменьшается интенсивность изнашивания и коэффициент трения.

Установлено, что значение концентраций спиртов при максимуме антифрикционных и противоизносных свойств совпадают с концентрациями, отвечающими эффекту максимальной стабилизации структуры воды добавками соответствующего спирта.

Найдено оптимальное соотношение предельного одноатомного спирта и воды в тройных системах «вода–спирт–многоатомный спирт».

Разработаны новые смазочные композиции с добавлением загустителя в виде глицерина.

Доказано, что полученные водные композиции не уступают минеральным маслам, а по некоторым показателям превосходят их, имея при этом менее сложный состав.

Данные смазочные композиции разрабатываются для замены индустриальных и трансмиссионных масел, которые используются в закрытых редукторах трансмиссии автомобильной техники, строительных и дорожных машин и других транспортно-технологических

комплексов. К таким редукторам можно отнести механические ступенчатые и планетарные коробки перемены передач, червячные редукторы типа Ч-100, червячные мотор-редукторы, цилиндрические редукторы типа 1Ц2У-100, РМ-250.

Следующим этапом исследования новых смазочных композиций будут стендовые и эксплуатационные испытания на реальных механизмах трансмиссии транспортно-технологических машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чооду О.А., Монгуш Э.С. Влияние климатических факторов на эксплуатационные показатели дорожно-строительных машин // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2013. № 3(18). С. 107–116.
2. Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности строительных и дорожных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 28. С. 66–71. DOI 10.26160/2658-3305-2024-28-66-71
3. Трофименко Б.П., Маркелов А.В. Совершенствование технической эксплуатации подвижного состава путем применения новых синтетических смазочных композиций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 1. С. 57–64.
4. Зарубин В.П., Киселев В.В., Пучков П.В. [и др.] Улучшение эксплуатационных характеристик автотранспортной техники за счет применения высокоеффективных присадок // Известия МГТУ МАМИ. 2014. Т. 3, № 1(19). С. 56–62.
5. Nadine S., Raddatz K., Tobie T. [and others]. Investigations on the Scuffing and Wear Characteristic Performance of an Oil Free Water-Based Lubricant for Gear Applications // Text: electronic // Lubricants. 2021. V. 9 (3). P. 24. DOI:10.3390/lubricants9030024
6. Ponnekanti N., Savita K. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. V. 16 (1). pp. 764–774. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.002
7. Тракторные масла, трансмиссионные масла для внедорожной техники // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2010. № 4. С. 22. URL: <https://rucont.ru/efd/178364>
8. Маньшев Д.А., Селезнев М.В. Результаты оценки показателей качества трансмиссионного масла при эксплуатации // Вестник НГИЭИ. 2018. № 7(86). С. 49–58.
9. Колесниченко Д.С., Корчагин Р.К., Соболь Д.А. Снижение стоимости владения техникой за счет применения высококачественных смазочных материалов // Горная промышленность. 2016. № 4(128). С. 38.

¹ ГОСТ 5020–75. Жидкость «Стеол-М». Технические условия: дата введения 01.01.77 / Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. Изд. официальное. М.: Издательство стандартов, 1984. С. 1–18.

10. Trajkovski A., Novak N., Pustavrh J. [and others]. Performance of Polymer Composites Lubricated with Glycerol and Water as Green Lubricants // *Applied sciences*. 2023. V. 13 (13). P. 7413. DOI:10.3390/app13137413
11. Senatore A., Pisaturo M., Guida D. Polyalkylene Glycol Based Lubricants and Tribological Behaviour: Role of Ionic Liquids and Graphene Oxide as Additives // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2018. V.18 (2). pp. 913–924. DOI:10.1166/jnn.2018.15253
12. Holmberg K., Erdemir A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions // *Friction*, 5, 2017. 263–284, URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
13. Luo J., Zhou X. Superlubricitive Engineering—Future Industry Nearly Getting Rid of Wear and Frictional Energy Consumption // *Friction*, 8, 2020. 643–665. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0393-0>
14. Rahman M. H., Warneke H., Webbert H. [and others] Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances // *Lubricants*. 2021. 9(8), URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants9080073>
15. Freschi M., Paniz A., Cerqueni E. [and others] The Twelve Principles of Green Tribology: Studies, Research, and Case Studies—A Brief Anthology // *Lubricants*. 2022. 10(6), URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants10060129>
16. Li L. [and others]. Impact of Water Content on the Superlubricity of Ethylene Glycol Solutions. Text: electronic // *Lubricants* 2023. 11(11). URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11110466>
17. Hua J. [and others]. Controllable Superlubricity Achieved with Mixtures of Green Ionic Liquid and Glycerol Aqueous Solution via Humidity Text: electronic // *J. Mol. Liq.*, 2022. 345. 117860, URL: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117860>
18. Монахова Ю.Б., Муштакова С.П. Квантовохимическое изучение системы вода – одноатомные спирты // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2006. Т. 6, № 1-2. С. 14–18.
19. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Измерение износов деталей машин в полевых условиях на основе метода искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 237–242.

REFERENCES

1. Choodu O.A., Mongush E.S. Influence of climatic factors on the performance of road construction machines. *Bulletin of the Tuva State University*. No. 3 Technical, physical and mathematical sciences. 2013; 3 (18): 107-116.
2. Trofimenco B.P., Markelov A.V., Korytov A.S. Analysis of the causes of low operational reliability of construction and road machines. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024. 28: 66-71. (In Russ.). DOI: 10.26160/2658-3305-2024-28-66-71
3. Trofimenco B.P., Markelov A.V. Improving the technical operation of rolling stock through the use of new synthetic lubricant compositions. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2024; (1): 57-64. (In Russ.).
4. Zarubin V.P., Kiselev V.V., Puchkov P.V. [and others] Improving the performance characteristics of motor vehicles through the use of highly effective additives. *Bulletin of Moscow State Technical University MAMI*. 2014. Vol. 3; 1(19): 56-62. (In Russ.).
5. Nadine S., Raddatz K., Tobie T. [and others] Investigations on the Scuffing and Wear Characteristic Performance of an Oil Free Water-Based Lubricant for Gear Applications. Text: electronic . *Lubricants*. 2021; 9 (3). R. 24. DOI:10.3390/lubricants9030024
6. Ponnekanti N., Savita K. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16 (1): 764-774. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.002
7. Tractor oils, transmission oils for off-road equipment. *World of oil products. Bulletin of oil companies*. 2010; (4). P. 22. URL: <https://rucont.ru/efd/178364> (date of access: 18.07.2025). (In Russ.).
8. Manshev D.A., Seleznev M.V. Results of evaluation of quality indicators of transmission oil during operation. *Bulletin of NGEI*. 2018; 7(86): 49-58. (In Russ.).
9. Kolesnichenko D.S., Korchagin R.K., Sobol D.A. Reducing the cost of equipment ownership through the use of high-quality lubricants. *Mining industry*. 2016; 4(128): 38. (In Russ.).
10. Trajkovski A., Novak N., Pustavrh J. [and others]. Performance of Polymer Composites Lubricated with Glycerol and Water as Green Lubricants. *Applied sciences*. 2023; 13 (13): 7413. DOI:10.3390/app13137413
11. Senatore A., Pisaturo M., Guida D. Polyalkylene Glycol Based Lubricants and Tribological Behavior: Role of Ionic Liquids and Graphene Oxide as Additives. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2018; .18 (2): 913-924. DOI:10.1166/jnn.2018.15253
12. Holmberg K., Erdemir A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions. *Friction*, 5, 2017; 263–284, URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5> (accessed 14.06.2025).
13. Luo J., Zhou X. Superlubricative Engineering—Future Industry Nearly Getting Rid of Wear and Frictional Energy Consumption. *Friction*, 8. 2020; 643–665. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0393-0>
14. Rahman M. H., Warneke H., Webbert H. [and others]. Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances. *Lubricants*, 9(8). 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants9080073> (accessed May 17, 2025).
15. Freschi M., Paniz A., Cerqueni E. [and others]. The Twelve Principles of Green Tribology: Studies, Research, and Case Studies—A Brief Anthology. *Lubricants*, 10(6). 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants10060129>
16. Li L. [and others]. Impact of Water Content on the Superlubricity of Ethylene Glycol Solutions – Text: electronic . *Lubricants*, 11(11).2023. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11110466>
17. Hua J. [and others]. Controllable Superlubricity Achieved with Mixtures of Green Ionic Liquid and Glycerol Aqueous Solution via Humidity – Text: elec-

tronic. *J. Mol. Liq.*, 2022; 345: 117860, URL: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117860>

18. Monakhova Yu. B., Mushtakova S. P. Quantum-chemical study of the water - monohydric alcohols system. *Bulletin of the Saratov University. New series. Series: Chemistry. Biology. Ecology.* 2006; 6, No. 1(2): 14-18. (In Russ.).

19. Efremov L. V., Tikalov A.V. Measurement of wear of machine parts in the field based on the method of artificial bases. *Izv. vuzov. Instrument engineering.* 2016; 59 (3): 237-242. (In Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Трофименко Б.П. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала статьи.

Маркелов А.В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, корректирование материала статьи.

Корытов А.С. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, подготовка отдельных материалов для статьи.

Осадчий Ю.П. Научное консультирование проводимого исследования, включая корректирование формулировки проблемы и поставленных задач, формирование общей схемы проведения и выбор методов исследования, проведение экспериментальных исследований, подготовка отдельных материалов для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Trofimenko Bogdan P. Review and analysis of the publications on the research issue. Coordinating and conducting the experimental studies, obtained data processing, preparation of the article material.

Markelov Aleksandr V. Organization of the author's team work, direction and research problem development, setting the objectives and choosing the study methods, editing of the article material.

Korytov Aleksey S. Planning and running the experimental studies, handling of the obtained results, working out individual materials for the article.

Osadchiy Yuryi P. Scientific consulting for ongoing research, including problem and task setting correction, generating a core scheme for the study, research methods' selection, conducting experiments, providing individual materials for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофименко Богдан Павлович – аспирант кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2487-9400>,
e-mail: bog6741@yandex.ru

Маркелов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доц. кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7125-6570>,

SPIN-код: 4362-4110,

Author ID (РИНЦ): 223288,

e-mail: alexander203.37@mail.ru

Корытов Алексей Сергеевич – магистр кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9147-2785>,

e-mail: a.s.k.2001@mail.ru

Осадчий Юрий Павлович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Транспорт и автомобильные дороги» Ивановского государственного политехнического университета (153000, г. Иваново, Шереметьевский пр., д. 21).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2279-0990>,

SPIN-код: 3065-5370,

Author ID (РИНЦ): 401366,

e-mail: osadchiy-y@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Trofimenko Bogdan P. – Postgraduate Student, Infrastructure and Transport Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskov Avenue, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2487-9400>,

e-mail: bog6741@yandex.ru

Markelov Aleksandr V. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Infrastructure and Transport Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskov Avenue, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7125-6570>,

SPIN-code: 4362-4110,

Author ID (RINTS): 223288,

e-mail: alexander203.37@mail.ru

Korytov Aleksey S. – Master of Science, Infrastructure and Transport Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskov Avenue, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9147-2785>,

e-mail: a.s.k.2001@mail.ru

Osadchiy Yuryi P. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Transport and Highways Department, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsk Avenue, Ivanovo, 153000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2279-0990>,

SPIN-код: 3065-5370,

Author ID (RINTS): 401366,

e-mail: osadchiy-y@mail.ru