Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 170–179
Agrarian Scientific Journal. 2025;(11):170–179

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 621.892.099.6
https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp170-179

Моделирование температурного массопереноса в трибологических системах

Валентин Владимирович Сафонов, Дмитрий Анатольевич Никитин, Василий Васильевич Чекмарев, Андрей Анатольевич Жиздюк, Константин Валентинович Сафонов
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия
e-mail: safonow2010sgau@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены исследования влияния температурного состояния пар трения во взаимодействии с масляной композицией ультрадисперсных материалов на их износ. Отмечается, что по данным ряда авторов температуры в зоне трибосопряжений могут достигать 280…600 °С. Размер частиц в качестве добавок в масло можно рассматривать как катализатор процессов, протекающих при более низких значениях температур, и это означает, что с ультрадисперсными частицами металлов возможны химические превращения, не осуществляемые с массивными металлами. Предполагается, что для повышения эффективности формирования поверхностного слоя ультрадисперсные порошки, присутствующие в зоне контакта трущихся деталей, должны не только отличаться высокими смазывающими свойствами, но и находиться в состоянии, обеспечивающем их плавление при температуре, возникающей в зоне контакта трущихся деталей. В работе отмечено, что физико-химические процессы с ультрадисперсными частицами происходят при температуре на сотни градусов ниже температуры плавления сырья – 0,7 $T_{пл}$. Так, температура плавления порошкообразной меди, легированной фосфором, снижается на 350… 400 °С. Ультрадисперсное состояние меди, легированной фосфором, дополнительно приведет к снижению температуры плавления на 30 %. Температура плавления порошкообразной латуни Л-63 в ультрадисперсном состоянии должна составлять порядка 600…650 °С. С учетом этого использование в моторном масле смеси двух ультрадисперсных порошкообразных компонентов позволит перекрыть температурный диапазон их действия в интервале 400…650 °С. Также приводится методика и результаты экспериментальных трибологических исследований влияния температуры в зоне фактического контакта на износ наиболее ответственной и малоресурсной пары трения ДВС «гильза – поршневое кольцо». По результатам испытаний, сравнивая эффективность базового моторного масла SAE 10W-40 и смеси его с ультрадисперсной добавкой, можно констатировать существенное снижение величины износа трущихся образцов и восстановительный эффект. В работе также представлена математическая модель зависимости износа трибосопряжений от температуры.

Ключевые слова: трибосопряжения, моторное масло, ультрадисперсные частицы, температура, износ, долговечность

Для цитирования: Сафонов В. В., Никитин Д. А., Чекмарев В. В., Жиздюк А. А., Сафонов К. В. Моделирование температурного массопереноса в трибологических системах // Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 170–179. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp170-179.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Modeling of temperature mass transfer in tribological systems

Valentin V. Safonov, Dmitry A. Nikitin, Vasily V. Chekmarev, Andrey A. Zhizdyuk, Konstantin V. Safonov
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: safonow2010sgau@yandex.ru

Abstract. The paper presents studies of the effect of the temperature state of friction pairs in interaction with an oil composition of ultrafine materials on their wear. It is noted that, according to a number of authors, temperatures in the tribocoupling zone can reach 280...600 °C. The particle size as additives to oil can be considered as a catalyst for processes occurring at lower temperatures, which means that chemical transformations are possible with ultrafine metal particles that are not carried out with massive metals. It is assumed that in order to increase the efficiency of the formation of the surface layer, ultrafine powders present in the contact zone of the rubbing parts

should not only have high lubricating properties, but also be in a state that ensures their melting at the temperature occurring in the contact zone of the rubbing parts. It is noted that physical and chemical processes with ultrafine particles occur at a temperature of hundreds of degrees below the melting point of the raw material – 0.7 T_{pl}. Thus, the melting point of powdered copper doped with phosphorus is reduced by 350...400 °C. The ultrafine state of phosphorus-doped copper will additionally reduce the melting point by 30 %. The melting point of powdered brass L-63 in the ultrafine state should be about 600...650 °C. Therefore, the use of a mixture of two ultrafine powdered components in engine oil will make it possible to cover the temperature range of their action in 400...650 °C. Also there is a methodology and results of experimental tribological studies of the effect of temperature in the actual contact zone on the wear of the most important and low-resource pair of friction of the internal combustion engine "sleeve – piston ring". According to the test results, comparing the effectiveness of SAE 10W-40 base engine oil and its mixture with an ultrafine additive, it can be stated that there is a significant decrease in the amount of wear on the rubbing samples, and the formation of a restorative effect. The paper also presents a mathematical model of the temperature dependence of tribocoupling wear.

Keywords: tribocouplings, engine oil, ultrafine particles, temperature, wear, durability

For citation: Safonov V. V., Nikitin D. A., Chekmarev V. V., Zhizdyuk A. A., Safonov K. V. Modeling of temperature mass transfer in tribological systems. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(11):170–179. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp170-179.

Введение. Современная тенденция повышения мощности машин неизбежно влечет за собой ужесточение температурного режима работы подвижных сопряжений. В условиях граничной смазки способность смазочных слоев нести нагрузку в зоне контакта деталей зависит от взаимодействия компонентов смазочного материала с материалом и геометрией их поверхностей трения, что происходит за счет физической абсорбции, хемосорбции или трибохимических реакций. Определяющим фактором данных процессов является температура, возникающая при трении и вызывающая нагрев тонких поверхностных слоев сопряженных тел и смазочного слоя, разделяющего их [2, 33, 36, 37]. На разных температурных режимах существенно изменяются и фрикционно-износные характеристики трущихся деталей. Установлено, что в тяжело нагруженных узлах трения температура в контактных зонах достигает очень высоких значений (до 1000 °С и выше), что приводит к расплавлению металлических и разложению неметаллических материалов [6, 33].

В связи с этим требуют изучения вопросы, связанные с исследованием влияния возникающей при трении температуры на создание поверхностных пленок с необходимыми триботехническими свойствами и износ пар трения.

Одним из вариантов создания поверхностной пленки с требуемыми трибологическими характеристиками является использование порошкообразных добавок к смазочным материалам различных металлов, сплавов и их легированных соединений, имеющих различные температуры плавления. Для повышения противоизносных, антифрикционных и противозадирных свойств смазочных материалов в основном применяли такие металлы и сплавы, как медь, олово, цинк, алюминий, никель, кобальт, серебро, кадмий, бронзу, латунь и др. [4, 8, 10, 12, 13, 18, 20–27].

Дисперсность металлических порошков, добавляемых в смазочные материалы, существенно влияет на процесс образования поверхностной пленки, т.к. известно, что металлические порошки ультрадисперсного класса имеют высокую дефектность кристаллической решетки и отличаются наличием на поверхности большого числа нескомпенсированных связей и тем самым большой реакционной способностью. Учитывая это, размер частиц можно рассматривать как катализатор процессов, протекающих при более низких значениях температур. Это означает, что с ультрадисперсными частицами металлов возможны химические превращения, не осуществляемые с массивными металлами. При этом существенное влияние на эти процессы оказывают тип металла или сплава, параметры поверхностей трения, скорость относительного перемещения деталей, давление деталей друг на друга, температура в зоне контакта и т.д.

Согласно литературным данным, температурный интервал, возникающий в наиболее нагруженных зонах трения деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) двигателя составляет 280…600 °С [3, 38]. Определение интервала температур, возникающих на рабочих участках поверхностей трения, позволит обосновать состав порошкообразного наполнителя в металлсодержащих смазочных композициях.

Для повышения эффективности формирования поверхностного слоя ультрадисперсные порошки, присутствующие в зоне контакта трущихся деталей, должны не только отличаться

высокими смазывающими свойствами, но и находиться в состоянии, обеспечивающем их плавление при температуре, возникающей в зоне контакта трущихся деталей. Согласно литературным источникам, физико-химические процессы с ультрадисперсными частицами происходят при температуре на сотни градусов ниже температуры плавления сырья – 0,7 $T_{пл}$ [19, 28, 34].

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать гипотезу о том, что формировать поверхностные пленки с высокими трибологическими свойствами возможно за счет добавления определенных ультрадисперсных порошкообразных материалов в зону контакта трущихся деталей, которые в зависимости от конструкторско-технологических особенностей пары трения и условий эксплуатации смогут существенно повлиять на износостойкость деталей и долговечность ресурсоопределяющих агрегатов машин.

Современные технологии позволяют получать ультрадисперсные порошки (УДП) различных веществ с размерами частиц 0,01…0,03 мкм [29–31], что определяет их высокую стабильность при использовании в качестве добавок к маслу. Благодаря плазменной технологии получения УДП появляется возможность создания бинарных, легированных и композиционных добавок к смазочным средам [31, 32].

Наиболее часто встречающимся элементом металлсодержащих добавок к смазочным средам является медь. Это можно объяснить желанием разработчиков получить на поверхности трения медную пленку, приводящую к созданию систем автокомпенсации неравновесных процессов изнашивания и снижения трения. Данный эффект был обнаружен советскими учеными Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским и носит название «избирательного переноса» [1, 5, 9].

Кроме того, в смазочных материалах широко применяются органические соединения серы и фосфора [28, 35]. При особо жестких условиях работы пар трения присутствие в зоне контакта серы приводит к образованию сульфидов. При действии фосфорсодержащих элементов создаются эвтектические сплавы металла с фосфором, отличающиеся пониженной температурой плавления и высокой пластичностью. Применение S- и P-содержащих соединений обеспечивает комплексный эффект – фосфор снижает износ и сглаживает поверхности, сера снижает трение и является катализатором противозадирного эффекта.

Обоснование состава порошкообразной добавки к смазочным материалам, состоящих из смеси УДП, обладающей наилучшими трибологическими свойствами, осуществляли в ходе ранее проведенных лабораторных испытаний на машинах трения МИ-1 и СМЦ-2 [15, 17]. Программа предусматривала проведение сравнительных трибологических испытаний базового масла SAE 10W-40 и смазочных композиций, состоящих из смеси базового масла SAE 10W-40 с УДП некоторых цветных металлов, сплавов и их легированных соединений. Результаты предварительных лабораторных испытаний экспериментальных пар трения на моторном масле с различными ультрадисперсными порошкообразными добавками показали, что смесь УДП меди, легированной серой и фосфором, и УДП латуни отличается наиболее высокими трибологическими показателями.

Выбор состава порошкообразной добавки к моторному маслу основывали на гипотезе соизмеримости температуры плавления компонентов добавки с температурами, возникающими в зоне трения деталей ЦПГ двигателя.

Так, температура плавления порошкообразной меди (ПМС-1 ГОСТ 4960-2017), легированной фосфором (ГОСТ 8986-82), снижается на 350…400 °С [35]. Ультрадисперсное состояние меди, легированной фосфором, дополнительно приведет к снижению температуры плавления на 30 % [19]. В результате температура плавления УДП меди, легированной фосфором, должна находиться в интервале 400…500 °С. Температура плавления порошкообразной латуни Л-63 (ТУ-08-123-2012) в ультрадисперсном состоянии должна составлять порядка 600…650 °С. Таким образом, использование в моторном масле смеси двух ультрадисперсных порошкообразных компонентов позволит перекрыть температурный диапазон их действия в интервале 400…650 °С. Технология приготовления предлагаемой порошкообразной добавки к моторному маслу и их оптимальная концентрация достаточно подробно представлены в статьях [7, 10, 14, 16–18].

Материалы и методы. Для определения влияния температуры в зоне фактического контакта на износ наиболее ответственной и малоресурсной пары трения ДВС «гильза – поршневое кольцо» в лабораторных условиях использовали модернизированную машину трения МИ-1М

(рисунок 1). Исследования проводили в условиях трения-скольжения по схеме «ролик – колодка». Основу смазочного материала составляло моторное масло SAE 10W-40. Для воспроизводства пары трения «гильза – поршневое кольцо» колодки и ролики изготавливали из серого чугуна СЧ-25 одной плавки. Твердость образцов – 190…220 НВ. Шероховатость рабочей поверхности *Ra* ролика и колодки 0,32 и 0,64 мкм соответственно.

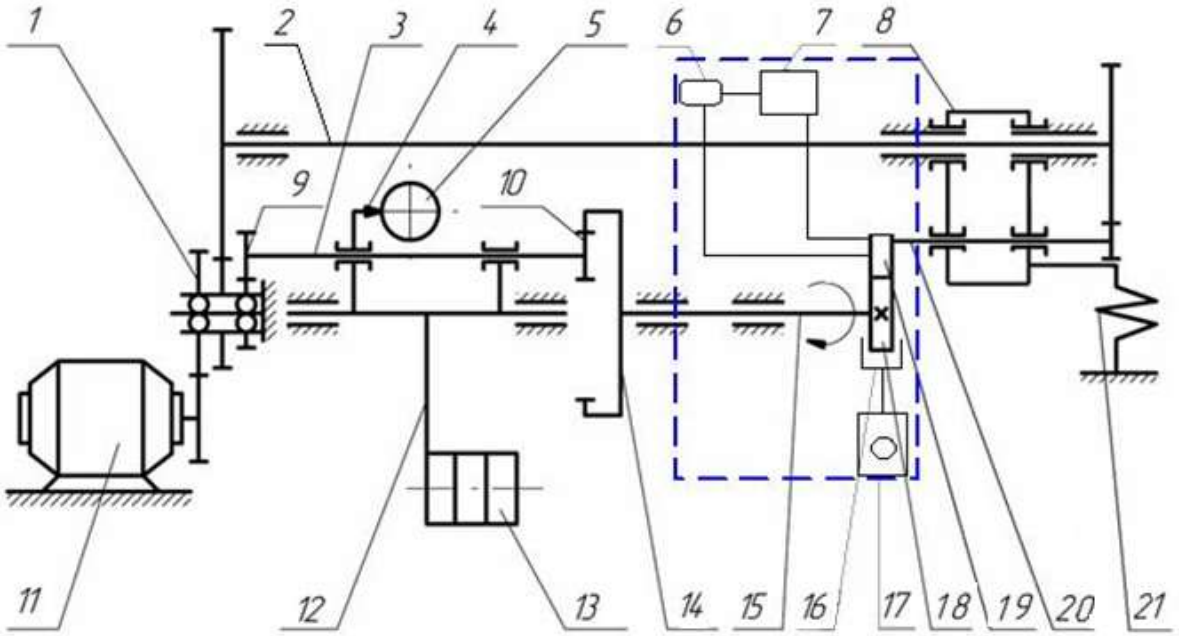

Рисунок 1 – Кинематическая схема модернизированной машины трения МИ-1М:
1 – блок зубчатых колес; 2, 3 – валы; 4 – карандаш; 5 – барабан; 6 – насос шестеренный; 7 – радиатор;
8 – корпус каретки; 9, 10 – зубчатые колеса; 11 – электродвигатель; 12 – маятник; 13 – грузы;
14 – зубчатое колесо с внутренним зацеплением; 15 – шпиндель; 16 – керамический нагреватель;
17 – блок управления нагревателем (автотрансформатор); 18 – ролик; 19 – колодка; 20 – вал каретки;
21 – нагрузочное устройство

Figure 1 – Kinematic diagram of the upgraded MI-1M friction machine:
1 – block of gears; 2, 3 – shafts; 4 – pencil; 5 – drum; 6 – gear pump; 7 – radiator; 8 – carriage body; 9, 10 – gears;
11 – electric motor; 12 – pendulum; 13 – loads; 14 – gear wheel with internal engagement; 15 – spindle;
16 – ceramic heater; 17 – heater control unit (autotransformer); 18 – roller; 19 – deck; 20 – carriage shaft;
21 – loading device

Испытания проводили в течение 1 ч на каждом температурном интервале в 4 этапа: первый этап – при температуре 50 °С, второй – при 200 °С, третий – при 400 °С и четвертый – при 600 °С. Нагрузку на пару трения создавали с помощью специального нагрузочного устройства, имеющегося на машине трения. Пуск машины осуществляли при нагрузке на образцы 90 Н, после чего нагрузку постепенно увеличивали и в течение 2 мин доводили до 1000 Н. Пары трения предварительно прирабатывали в течение 3 ч на масле SAE 10W-40 при нагрузке 800 Н. Износ образцов определяли каждый час взвешиванием, после чего эксперимент продолжали. Эксперимент проводили с трехкратным повторением.

Для создания необходимой температуры в зоне контакта использовали керамический нагреватель собственного изготовления, который накрывал свободную часть нижнего образца – ролика. Нагревание ролика регулировали за счет изменения напряжения, подводимого к керамическому нагревателю с помощью автотрансформатора ЛАТР Ресанта TDGC2-1 (ролик нагревали с 200 до 600 °С с интервалом 200 °С). Поскольку температура вспышки масла SAE 10W-40 составляет 234 °С, в целях пожарной безопасности использовали охлаждающий радиатор, погруженный в лед. Движение масла в контуре осуществляли шестеренным насосом НМШ 25А. В процессе испытаний на протяжении каждого этапа поддерживали необходимую температуру рабочей поверхности ролика. Периодически останавливали машину трения и определяли износ образцов по разности их массы до и после опыта на аналитических весах HR-250AZG с точностью 0,1 мг. Температуру трущейся поверхности ролика в процессе эксперимента измеряли с помощью цифрового пирометра Mastech MS6530.

Результаты исследований. Обработка полученных экспериментальных данных показала, что существует зависимость износа образцов (ролика) от температуры поверхности трения и используемой смазочной среды (рисунки 2, 3). Так, средний износ образцов трения (ролика), работавших на масле SAE 10W-40 при температуре его поверхности 200 °С, составил 5,0 мг, а при температуре 400 °С – 0,4 мг, что в 12,5 раз меньше, при температуре 600 °С – 0,8 мг, что в 6,3 раз меньше, чем при температуре 200 °С. При испытании масла SAE 10W-40 с предлагаемой добавкой и увеличением температуры в зоне трения с 200 до 600 °С наблюдался прирост массы образца. Данный эффект происходил за счет процесса образования поверхностной пленки и заполнения впадин шероховатости и дефектов поверхности трения образцов ультрадисперсными компонентами предлагаемой добавки [7].

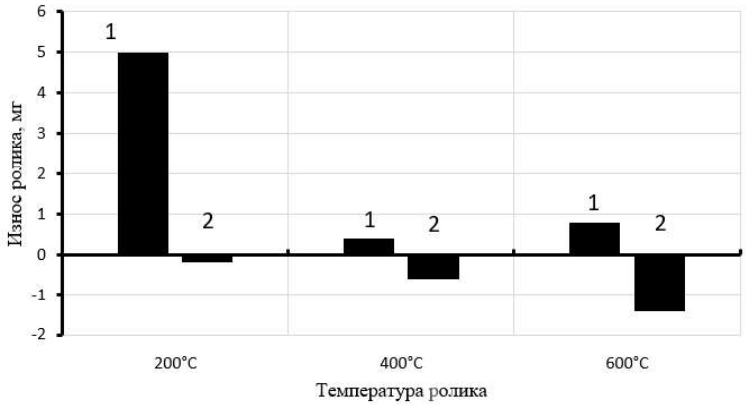

Рисунок 2 – Гистограмма износа ролика при различных температурах:
1 – моторное масло SAE 10W-40 без добавки; 2 – моторное масло SAE 10W-40 с предлагаемой добавкой

Figure 2 – Histogram of roller wear at various temperatures:
1 – SAE 10W-40 engine oil without additives; 2 – SAE 10W-40 engine oil with proposed additive

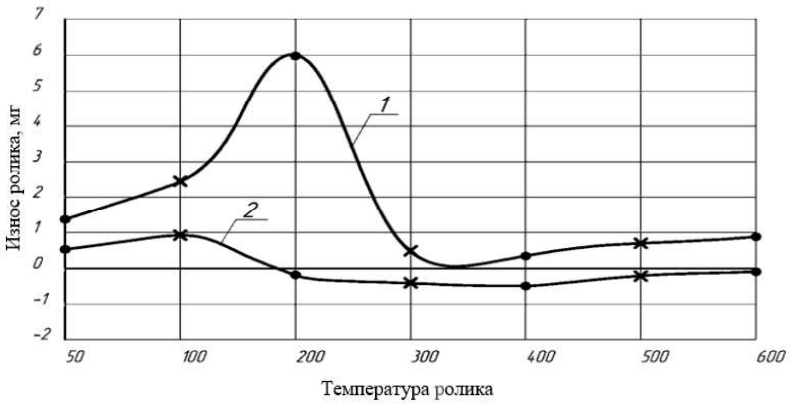

Рисунок 3 – Зависимость износа образцов от температуры поверхностей трения:
1 – моторное масло SAE 10W-40 без добавки; 2 – моторное масло SAE 10W-40 с предлагаемой добавкой

Figure 3 – Dependence of the wear of the samples on the temperature of the friction surfaces:
1 – SAE 10W-40 engine oil without additives; 2 – SAE 10W-40 engine oil with proposed additive

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении температуры в зоне трения образцов с 50 до 600 °С величина их износа изменяется по сложной зависимости. На первом этапе при испытании образцов на базовом моторном масле SAE 10W-40 и увеличении температуры в зоне трения с 50 до 200 °С происходит интенсивное увеличение износа ролика с 1,0 до 5,0 мг, а при увеличении температуры с 200 до 400 °С происходит снижение величины износа образцов с 5,0 до 0,4 мг. Это происходит, по-видимому, за счет вступления в реакцию противоизносной присадки, находящейся в составе базового моторного масла. При дальнейшем повышении температуры с 400 до 600 °С происходит незначительное увеличение износа образцов с 0,4 до 0,8 мг, что свидетельствует о нестабильности действия противоизносной присадки или ее срабатывании.

Во время испытаний образцов трения на моторном масле SAE 10W-40 с предлагаемой добавкой износ изменялся следующим образом: в диапазоне температур 50…100 °С происхо-

дило увеличение износа образцов с 0,5 до 1,0 мг, а в диапазоне температур 100…200 °С происходило снижение износа образцов. При температуре около 200 °С наблюдали восстановительный эффект (увеличение массы образцов трения). Данный эффект сохранялся до конца эксперимента (до 600 °С), но уменьшился в 2 раза с 0,2 мг при 200 °С до 0,1 мг при 600 °С. Наибольшее значение прироста массы образцов зафиксировали при температуре около 400 °С – 0,4 мг. Образованию и поддержанию данного эффекта, по-видимому, способствуют компоненты прилагаемой порошкообразной добавки, образующие поверхностные пленки при различных температурах.

В целом, сравнивая эффективность базового моторного масла SAE 10W-40 и смеси его с ультрадисперсной добавкой, можно констатировать о существенном снижении величины износа трущихся образцов и образовании восстановительного эффекта.

Определение теоретической зависимости влияния температуры в зоне трения образцов на величину их износа при использовании смазочной композиции, состоящей из смеси базового масла SAE 10W-40 и предлагаемой порошкообразной добавки, проводили в следующей последовательности.

Первоначально результаты экспериментов представили в виде таблицы и рисунка 4.

Результаты экспериментов

Experimental results

Температура в зоне трения *t*, °С	50	100	200	300	400	500	600
Износ *I*, мг	0,5	1,0	–0,2	–0,3	–0,4	–0,2	–0,1

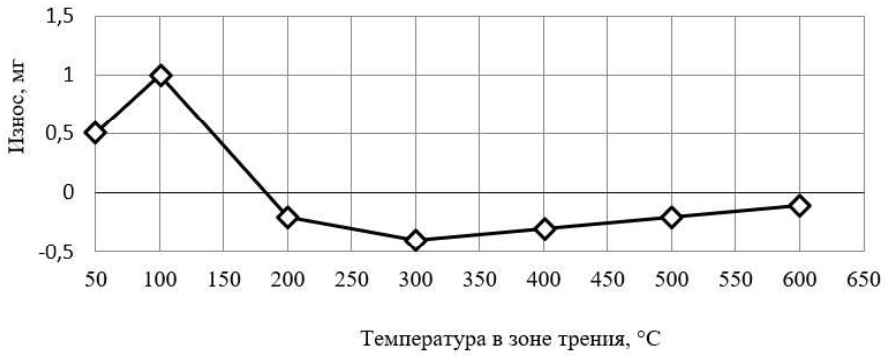

Рисунок 4 – Графическая интерпретация зависимости износа образцов от температуры поверхности трения

Figure 4 – Graphical interpretation of the dependence of sample wear on the temperature of the friction surface

Известно, что зависимость износа деталей от температуры можно описать функцией [37]

$$I(t) = D_1 + \frac{D_2}{(D_3(t-\vartheta_{m1}))^2+1} + \frac{D_4}{(D_5(t-\vartheta_{m2}))^2+1}, \quad (1)$$

где D_1, D_2, D_3, D_4 и D_5 – коэффициенты, обусловленные условиями работы трибосопряжения; ϑ_{m1} и ϑ_{m2} – коэффициенты, характеризующие состав добавки; t – температура в зоне трения.

Для аппроксимации зависимости износа образцов от температуры необходимо определить 7 значений коэффициентов.

Учитывая, что при проведении эксперимента результаты снимали в 7 точках, то задача представляется решаемой, т.к. число неизвестных коэффициентов не превышает числа известных значений.

Для определения неизвестных коэффициентов D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 зависимости (1) применили метод наименьших квадратов, согласно которому необходима минимизация следующей функции:

$$\Phi(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \vartheta_{m1}, \vartheta_{m2}) = \sum_{i=1}^{n} (I(t_i) - I_i)^2, \quad (2)$$

где n – количество результатов измерений; I_i – результат эксперимента при i-ом измерении; t_i – значение аргумента (в нашем эксперименте – температуры) при i-ом измерении.

Для решения задачи необходимо минимизировать не саму функцию $\Phi(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \vartheta_{m1}$ и ϑ_{m2}, а ее среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n+1}\sum_{i=1}^{n}(I(t_i) - I_i)^2}. \quad (3)$$

Однако в нашем случае минимизация СКО происходит при минимизации самой функции $\Phi(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \vartheta_{m1}$ и $\vartheta_{m2})$ так что далее будем минимизировать ее.

Как известно, необходимым и достаточным условием экстремума функции многих переменных $\Phi(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \vartheta_{m1}$ и $\vartheta_{m2})$ является равенство нулю ее частных производных по каждому из определяемых коэффициентов $\frac{\partial\Phi}{\partial D_1}$, $\frac{\partial\Phi}{\partial D_2}$, $\frac{\partial\Phi}{\partial D_3}$, $\frac{\partial\Phi}{\partial D_4}$, $\frac{\partial\Phi}{\partial D_5}$, $\frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta_{m1}}$ и $\frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta_{m2}}$.

Продифференцировав функцию 2 последовательно по D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, ϑ_{m1} и ϑ_{m2}, получили:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial D_1} = 2D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{(D_3+\vartheta_{m1}+t_i)^2+1} + 2D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{D_5+\vartheta_{m2}+t_i)^2+1} - 2\sum_{i=1}^{n}I_i + 2D_1; \quad (4)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial D_1} = 2D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{(D_3+\vartheta_{m1}+t_i)^2+1} + 2D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_3+\vartheta_{m1}+t_i)^2+1\right]^2} - 2D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_3+\vartheta_{m1}+t_i)^2+1\right]\left[(D_5+\vartheta_{m2}+t_i)^2+1\right]} - 2\sum_{i=1}^{n}\frac{I_i}{(D_3+\vartheta_{m1}-t_i)^2+1}. \quad (5)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial D_3} = -4D_2D_3\left[D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m1}-t_i)^2}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2} + D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m1}-t_i)^2}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^3}\right] + D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m1}-t_i)^2}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2\left[(D_5)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]} - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2}(\vartheta_{m1}-t_i)^2 I_i\right]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial D_4} = 2D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]\left[(D_5)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]} - 2\sum_{i=1}^{n}\frac{I_i}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^3} + 2D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]} + 2D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial D_5} = -4D_4D_5\left[D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m2}-t_i)^2}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2} + D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m2}-t_i)^2}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^3}\right] + D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m2}-t_i)^2}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]} - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2}(\vartheta_{m1}-t_i)^2 I_i\right]; \quad (8)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta_{m1}} = 2D_2(D_3)^2\left[2D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2} - 2\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2}\right] - 2\vartheta_{m1}\left[D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m1}-t_i)^2}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]} - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2}I_i\right] + D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2}\right] + D_2\left[\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^3}\right] + 2D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^3} + 2D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]}\right]. \quad (9)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta_{m1}} = 2D_4(D_5)^2 2\left[2D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2} - 2\sum_{i=1}^{n}\frac{I_i t_i}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^3} - \right.$$
$$- 2\vartheta_{m1}\left[D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{(\vartheta_{m1}-t_i)^2}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]^2\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]} - \left[\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2}I_i\right] + \right.$$
$$+\left[D_1\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2} + D_4\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^3}\right] + 2D_4\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^3}\right] +$$
$$\left. + \left[2D_2\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\left[(D_3)^2(\vartheta_{m1}-t_i)^2+1\right]\left[(D_5)^2(\vartheta_{m2}-t_i)^2+1\right]^2}\right]. \qquad (10)$$

Соответственно, система уравнений, решением которой являются искомые значения коэффициентов D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, ϑ_{m1} и ϑ_{m2} будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial\Phi}{\partial D_1} = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial D_2} = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial D_3} = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial D_4} = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial D_5} = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta_{m1}} = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta_{m2}} = 0 \end{cases}. \qquad (11)$$

Решение системы уравнений (11) дало следующие результаты: D_1 = 0,145; D_2 = 1,223; D_3 = –0,020; D_4 = –0,624; D_5 = 0,004268; ϑ_{m1} = 100; ϑ_{m2} = 200, а функция (1) примет вид:

$$I(t) = 0{,}145 + \frac{1{,}223}{(-0{,}02(t-100))^2+1} - \frac{0{,}624}{(0{,}004268(t-200))^2+1}. \qquad (12)$$

На рисунке 5 представлено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета по формуле (12), что говорит об их хорошей сходимости.

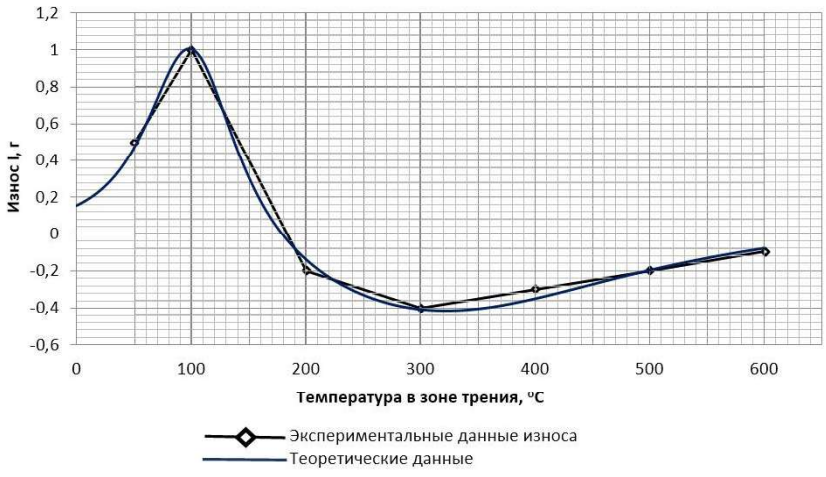

Рисунок 5 – Сопоставление результатов эксперимента и теоретических расчетов

Figure 5 – Comparison of experimental results and theoretical calculations

Заключение. Анализ графической интерпретации результатов экспериментов по определению влияния температуры на износ образцов в условиях смазочной среды, состоящей из базового масла SAE 10W-40 и ультрадисперсной порошкообразной добавки (смесь ультрадисперсного порошка латуни и меди, легированной серой и фосфором), показал, что компоненты добавки существенно снижают износ трущихся деталей и даже способствуют образованию восстановительного эффекта (увеличение массы образцов) по сравнению с базовым маслом SAE 10W-40 в интервале температур 200…600 °С. Однако износ образцов сохраняется в интервале температур 50…200 °С.

Представленные результаты исследования показывают, что температура в зоне фрикционного контакта трущихся сопряжений существенно влияет на величину износа деталей. Использование предлагаемой добавки к моторному маслу SAE 10W-40 будет способствовать увеличению ресурса трущихся деталей и двигателя в процессе эксплуатации. В дальнейшем для повышения эффективности порошкообразной добавки необходимо дополнительно ввести в нее компонент с температурой плавления в интервале 100…200 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браун Э. Д., Евдокимов Ю. А., Чичинадзе А. В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение, 1982. 248 с.

2. Влияние температурной деформации деталей цилиндропоршневой группы ДВС на силовое взаимодействие сопряжения кольцо – гильза цилиндра / Д. А. Никитин [и др.] // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. науч. трудов, посвящ. 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по матер. 79-й науч.- методич. и науч.-исследоват. конф. МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 года. М.: МАДИ, 2021. С. 283–290. EDN: BBALLJ.

3. Высокотемпературная смазочная композиция: патент № 2517175 Российская Федерация, МПК C10 M 141/02, C10 M 125/10, C10 N 20/06, C10 N 30/06, C10 N 30/08 / П. А. Харин, Т. Л. Харламова, В. С. Востриков; заявл. 25.12.2012; опубл. 27.05.2014.

4. Гаркунов Д. Н., Мельников Э. Л. Безизносное трение и водородное изнашивание металлов в решении основных трибологических проблем качества механизмов и машин // Известия МГТУ МАМИ. 2015. Т. 2. № 1(19). С. 205–214.

5. Композиция смазочного масла для дизельных двигателей. CN107353975A. Режим доступа: ru-i.espacenet.com; дата обращения: 02.09.2023.

6. Многофункциональная добавка к моторным маслам / В. В. Остриков [и др.] // Двигателестроение. 2014. № 2(256). С. 32–35.

7. Наноме таллический комплексообразователь для моторного масла. CN104178326A. Режим доступа: ru-i.espacenet.com; дата обращения: 02.09.2023.

8. О влиянии нано- и высокодисперсных порошкообразных добавок на эксплуатационные свойства моторного масла / В. В. Сафонов [и др.] // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 100–105.

9. Оптимизация нанодисперсной добавки в моторное масло / Э. К. Добринский [и др.] // Вестник АПК Ставрополья. 2014. № 3(15). С. 12–16.

10. Остриков В. В., Зимин А. Г., Попов С. Ю. Повышение эффективности действия ремонтно-восстановительных составов // Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 30–36.

11. Перспективные рецептуры моторных масел с нанодисперсными добавками для двигателей внутреннего сгорания / К. В. Сафонов [и др.] // Химия и технология топлив и масел. 2022. № 1(629). С. 16–18.

12. Свойства материалов с ультрадисперсной структурой / В. Б. Федоров [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. 1984. № 4. С. 123–130.

13. Смазочная композиция: патент № 2202600 Российская Федерация, МПК C10 M 137/10, C10 M 137/10, C10 M 125/04, C10 M 133/16, C10 N 30/06 / П. П. Дудко, В. Н. Кузьмин; заявл. 02.07.2001; опубл. 20.04.2003.

14. Смазочная композиция: патент № 2596820 Российская Федерация, МПК C10 M 141/00, C10 M 125/02, C10 M 125/22, C10 M 107/04, C10 M 107/20, C10 M 107/46, C10 N 20/06, C10 N 30/06, C10 N 50/08. / А. П. Краснов [и др.]; заявл. 22.04.2015; опубл. 10.09.2016.

15. Способ диспергирования наноразмерного порошка меди в базовом моторном масле: патент № 2591918 Российская Федерация, МПК C10 M 177/00, B82 B 1/00, B22 F 9/04, C10 M 125/04 / Н. С. Хитерхеева [и др.]; заявл. 08.12.2014; опубл. 20.07.2016.

16. Способ получения нанокластеров металлов и устройство для его осуществления: патент № 2382069 Российская Федерация, МПК C10 M 125/04, C25 C 7/00, B82 B 3/00 / Ю. П., Кужаров А. С. Косогова, А. А. Кужаров; заявл. 06.08.2008; опубл. 20.02.2010.

17. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления: патент № 2207933 Российская Федерация, МПК7 B 22 F9/12 / А. В. Кириллин [и др.]; заявл. 10.07.2001; опубл. 10.07.2003.

18. Федорченко И. М. Влияние фосфора на антифрикционные свойства материала на основе легированного железа // Порошковая металлургия. 1999. № 11. С. 99–101.

19. Temperature deformation of cylinder-piston group parts of uprated diesels and gas engines for KAMAZ vehicles / D. A. Nikitin et al. // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. No. 4.36. P. 117–120. EDN: CDRVPE.

REFERENCES

1. Brown E. D., Evdokimov Yu. A., Chichinadze A. V. Modeling of friction and wear in machines. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 248 p. (In Russ.).

2. The influence of temperature deformation of parts of the cylinder piston group of the internal combustion engine on the force interaction of the ring – cylinder liner interface / D. A. Nikitin, A. R. Asoyan, S. V. Snarsky. *Problems of Technical Operation and Car Service of Rolling Stock of Motor Transport: A Collection of Scientific Papers Dedicated to the 85th Anniversary of the Department of EATIS MADI, Based on Materials 79-th MADI Scientific, Methodological and Research Conference*. Moscow, January 26–27, 2021. Moscow: MADI. 2021:283–290. EDN: BBALLJ. (In Russ.).

3. High-temperature lubricating composition: patent No. 2517175 Russian Federation, IPC C10 M 141/02, C10 M 125/10, C10 N 20/06, C10 N 30/06, C10 N 30/08 / P. A. Kharin, T. L. Kharlamova, V. S. Vostrikov; appl. 12/25/2012; publ. 05/27/2014. (In Russ.).

4. Garkunov D. N., Melnikov E. L. Wear-free friction and hydrogen wear of metals in solving basic tribological quality problems of mechanisms and machines. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2015;2- 1(19):205–214. (In Russ.).

5. The composition of lubricating oil for diesel engines. CN107353975A. Available at: ru- i.espacenet.com; reference date: 09/02/2023. (In Russ.).

6. Multifunctional additive for engine oils / V. V. Ostrikov, A. G. Zimin, S. Yu. Popov, V. V. Safonov. *Dvigatelestroyeniye*. 2014;2(256):32–35. (In Russ.).

7. Nano-metal complexing agent for engine oil. CN104178326A. Available at: ru-i.espacenet.com; reference date: 09/02/2023. (In Russ.).

8. On the influence of nano- and highly dispersed powder additives for performance engine oil properties / V. V. Safonov, S. A. Shishurin, V. V. Ostrikov, A. M. Zakharevich, K. V. Safonov. *Agrarian Scientific Journal*. 2022;(12):100–105. (In Russ.).

9. Optimization of nanodisperse additives in engine oil / E. K. Dobrinsky, V. V. Safonov, A. V. Gorokhovsky, V. N. Buylov, A. S. Azarov. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2014;3(15):12–16. (In Russ.).

10. Ostrikov V. V., Zimin A. G., Popov S. Y. Improving the effectiveness of repair and recovery compounds. *Science in Central Russia*. 2013;(5):30–36. (In Russ.).

11. Promising formulations of motor oils with nanodisperse additives for internal combustion engines / K. V. Safonov, V. V. Safonov, V. V. Ostrikov, V. I. Orobinsky. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2022;1(629):16–18. (In Russ.).

12. Properties of materials with an ultrafine structure / V. B. Fedorov, M. H. Shorshorov, I. D. Morokhov, Yu. V. Tyurkin. *Physics, Chemistry and Mechanics of Surfaces*. 1984;(4):123–130. (In Russ.).

13. Lubricant composition: patent No. 2202600 Russian Federation, IPC C10 M 137/10, C10 M 137/10, C10 M 125/04, C10 M 133/16, C10 N 30/06 / P. P. Dudko, V. N. Kuzmin; appl. 07/02/2001; publ. 04/20/2003. (In Russ.).

14. Lubricant composition: patent No. 2596820 Russian Federation, IPC C10 M 141/00, C10 M 125/02, C10 M 125/22, C10 M 107/04, C10 M 107/20, C10 M 107/46, C10 N 20/06, C10 N 30/06, C10 N 50/08 / A. P. Krasnov, O. V. Afonicheva, D. I. Buyaev, V. G. Mitin, A. V. Naumkin, V. A. Solovyova, A. S. Yudin, M. V. Goroshkov; appl. 04/22/2015; publ. 09/10/2016. (In Russ.).

15. Method of dispersing nanoscale copper powder in base engine oil: patent No. 2591918 Russian Federation, IPC C10 M 177/00, B82 B 1/00, B22 F 9/04, C10 M 125/04 / N. S. Hiterheeva, A.V. Nomoev, S. P. Bardakhanov, S. B. Batoroev; appl. 12/08/2014; publ. 07/20/2016. (In Russ.).

16. A method for obtaining metal nanoclusters and a device for its implementation: patent No. 2382069 Russian Federation, IPC C10 M 125/04, C25 C 7/00, B82 B 3/00 / Yu. P. Kosogova, A. S. Kuzharov, A. A. Kuzharov; appl. 08/06/2008; publ. 02/20/2010. (In Russ.).

17. A method for obtaining ultrafine powder and a device for its implementation: patent No. 2207933 Russian Federation, IPC7 V 22 F9/12 / A. V. Kirillin, E. K. Dobrinsky, E. A. Krasyukov, S. I. Malashin; appl. 07/10/2001; publ. 07/10/2003. (In Russ.).

18. Fedorchenko I. M. The effect of phosphorus on antifriction properties of a material based on alloyed iron. *Powder Metallurgy*. 1999;(11):99–101. (In Russ.).

19. Temperature deformation of cylinder-piston group parts of uprated diesels and gas engines for KAMAZ vehicles / D. A. Nikitin, G. D. Mezhetsky, V. V. Chekmarev. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018;7(4.36)117–120. EDN: CDRVPE.

Статья поступила в редакцию 24.11.2024; одобрена после рецензирования 29.12.2024; принята к публикации 08.01.2025.
The article was submitted 24.11.2024; approved after reviewing 29.12.2024; accepted for publication 08.01.2025.