УДК: 620.3 *DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_1_19*

М. М. А. Захиват, А. В. Щегольков, Н. В. Земцова,
А. В. Щегольков, В. А. Кобелева

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО MoS_2, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ ПРИСАДКИ ДЛЯ МОТОРНОГО МАСЛА

Ключевые слова: дисульфид молибдена, моторное масло, сканирующая электронная микроскопия, трибология.

Вопросам улучшения эксплуатационных параметров двигателей внутреннего сгорания уделяется большое внимание, и в этом отношении важное значение приобретает направление, связанное с улучшением качества моторного масла с помощью дисперсных присадок. В статье рассмотрены морфологические и трибологические свойства механоактивированного MoS_2, используемого в качестве присадки для полусинтетического моторного масла. Методом электронной (сканирующей) микроскопии были исследованы полученные материалы, а также было проанализировано распределение частиц MoS_2 в качестве присадки в моторные масла. Кроме того проведена ИК-спектроскопия материала до и после механоактивации. Проведены комплексные сравнительные исследования трибологических показателей (на машине трения МИ-1М:время приработки, приработочный износ, отношение коэффициентов трения, установившийся коэффициент трения и суммарный износ) моторного масла с присадкой MoS_2 и без. При этом массовая концентрация MoS_2 в моторном масле (Mannol Semi-synthetic Classic 10W-40), изменялась от 0,03 до 0,07 с шагом 0,02 мас.%. Установлено, что добавка в моторное масло MoS_2 уменьшает износ с 5,7 до 4,1 мкм, при снижении установившегося коэффициента трения с 0,115 до 0,08, что следует из уменьшения установившийся коэффициент трения с 0,115 до 0,08. Время, в течении которого происходит приработка увеличивается с 1,57 до 2 ч, что также снижает трение при использовании моторного масла с присадкой MoS_2. При этом в процессе эксплуатации концентрация присадки MoS_2 в моторном масле снижается, что приводит к ухудшению свойств. Так уменьшение концентрации с 0,07 до 0,03 (изменение на 57%) увеличивает износ с 7,7 до 7,90 мкм, что составляет 2,5%, а при уменьшении концентрации с 0,07 до 0,05 увеличение износа 1,2%. Таким образом, учитывая факторы, связанные с фильтрацией, накопительным эффектом и значениями исследованных типологических параметров, оптимальным является концентрация MoS_2 в диапазоне 0,03 до 0,07 мас.%.

M. M. A. Zakhivat, A. V. Shchegolkov, N. V. Zemtsova,
A. V. Shchegolkov, V. A. Kobeleva

MORPHOLOGICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MECHANOACTIVATED MoS_2, USED AS AN ADDITIVE FOR ENGINE OIL

Key words: molybdenum disulfide, engine oil, scanning electron microscopy, tribology.

The issues of improving the operational parameters of internal combustion engines are given a lot of attention, and in this regard, the direction related to improving the quality of engine oil with the help of dispersed additives is of great importance. In the article morphological and tribological properties of mechanically activated MoS_2 used as an additive for semi-synthetic engine oil are considered. The obtained materials were investigated by the method of electron (scanning) microscopy, and the distribution of MoS_2 particles as an additive in motor oils was analyzed, as well as IR spectroscopy of the material before and after mechanoactivation was carried out. Comprehensive comparative studies of tribological parameters (friction machine MI-1M) (running-in time, running-in wear, friction coefficient ratio, established friction coefficient and total wear) of motor oil with and without MoS_2 additive were carried out. The mass concentration of MoS_2 in the engine oil (Mannol Semi-synthetic Classic 10W-40), varied from 0.03 to 0.07 with a step of 0.02 wt.%. It was found that the addition of MoS_2 to the engine oil reduces wear from 5.7 to 4.1 microns, with a decrease in the steady-state coefficient of friction from 0.115 to 0.08, which follows from the decrease in the steady-state coefficient of friction from 0.115 to 0.08. The time during which the working-in process increases from 1.57 to 2 h, which also reflects the reduction of friction when using engine oil with MoS_2 additive. At the same time during operation the concentration of MoS_2 additive in engine oil decreases, which leads to deterioration of properties. So, reduction of concentration from 0.07 to 0.03 (change by 57%) increases wear from 7.7 to 7.90 microns, which is 2.5%, and when reducing the concentration from 0.07 to 0.05, the increase in wear is 1.2%. Thus, considering the factors related to filtration, accumulation effect and the values of the studied typological parameters, a MoS_2 concentration in the range of 0.03 to 0.07 wt.% is optimal.

Введение

Актуальность улучшения эксплуатационных параметров автотранспортной техники за счет улучшения качества моторного масла с помощью специализированных присадок связана с необходимостью решения экологических и энергетических проблем двигателей внутреннего сгорания (ДВС)[1, 2].

Присадки для моторного масла могут быть эффективной мерой, которая позволяет повысить экономическую эффективность ДВС [3] из-за уменьшения интенсификации трения его основных деталей [4]. Разработка новых типов присадок для моторного масла направлена на улучшение реологии смазочного материала, уменьшение коэффициента трения и, как следствие, снижение износа ДВС, что является решающим фактором для повышения ресурса и ~~п~~ КПД [3,4]. Присадки в первую очередь используются для снижения трения и защиты движущихся элементов ДВС от износа, улучшения

топливной экономичности и снижения загрязнения, а также концентрации токсичных компонентов в выхлопных газах [3]. Снижение трения может быть достигнуто за счет улучшения вискозиметрических свойств моторных масел и оптимизации поверхностного взаимодействия между присадками в моторном масле и элементами ДВС [4].

Присадки в моторном масле могут отличаться как по физико-химическим свойствам, так и функциональному назначению, что определяет их многообразие, которое включает такие виды присадок как: диалкилдитиофосфаты цинка, графит, дисульфид вольфрама и дисульфид молибдена (MoS_2) [5, 6] и т.д.

Из научных исследований, представленных в [7, 8] следует, что проводятся разработки по созданию новых типов наноразмерных присадок в моторное масло [9], которые позволяют уменьшить общий объем частиц в выхлопных газах от 49% до 91% на холостом ходу и в режиме нагрузки ДВС. Для оценки объема частиц в выхлопных газах авторы работы [9] использовали методику представленную в исследованиях [10], где применяется гистограмма распределения объема частиц в отношении к объему отработавших газов с помощью метода быстрой аэрозольной спектроскопии частиц.

В работе [11] трибологические характеристики исследовались на машине для испытаний на возвратно-поступательное скольжение SRV в конфигурации "стальной шар - стальной диск" в условиях температурных скачков. Полученные результаты свидетельствуют о положительной синергии между традиционной противоизносной присадкой и инновационными MoO_3 и MoS_2 NTs.

Монослои MoS_2 состоят из ковалентно связанных S–Mo–S, образующих сэндвич-структуру. Кроме того, отдельные слои MoS_2 связаны за счет взаимодействия Ван-дер-Ваальса, что приводит к низкому коэффициенту трения [12]. Благодаря этому уникальному свойству MoS_2 имеет применимость к различным типам смазочных материалов [13], самосмазывающиеся покрытия [14-16] и твердые смазочные материалы [17]. Результаты [18] показывают, что наноразмерные частицы MoS_2 в минеральном масле способны снизить характеристики износа и коэффициента трения при всех протестированных концентрациях, особенно при 2,0 мас.%. В работе [19] исследовали трибологическое поведение трех типов частиц MoS_2 (т.е. цветообразных, микросфер и нанолистов). Частицы MoS_2 были синтезированы обычным гидротермальным методом [20]. Было установлено, что все синтетические частицы MoS_2 могут улучшить смазочные свойства масла.

Коски и др. продемонстрировали, что наносмазки MoS_2 вызывают меньшие коэффициенты трения и износа, чем базовые смазочные материалы. Однако наночастицы имеют тенденцию к осаждению, когда масло неподвижно [21]. Из этого следует, что необходимо подбирать оптимальные размерные характеристики присадок, которые будут более устойчивы к осаждению.

В работе [22] проведены исследования влияния размеров дисперсных частиц противоизносной присадки на параметры износа модельных деталей пар трения. При этом обоснован диапазон размеров частиц присадки от 100 нм до 5-10 мкм, что связано с особенностями работы системы фильтрации ДВС. Несмотря на высокую эффективность применения MoS_2 в качестве присадок для моторных масел [12-22] и иных технологических задач остаются вопросы, связанные с технологиями введения MoS_2 в моторное масло, а также анализ структурных свойств с учетом оптимизации массовых концентраций и условий эксплуатации [23].

Таким образом целью настоящей работы является исследование морфологических и трибологических свойств механоактивированного MoS_2, используемого в качестве присадки для моторного масла, а также оценка гранулометрического состава до и после механоактивации.

Объекты и методы исследования

В исследованиях использовали MoS_2 по ТУ 48-19-133-90 (ООО «Плазмотерм», Москва, Россия). Для измельчения и активирования MoS_2, а также равномерного распределения MoS_2 в моторном масле использовался аппарат вихревого слоя (АВС) [24]. Время обработки MoS_2 в АВС составило 10 с. Распределение частиц MoS_2 в моторном масле происходило в течение 5 с. В исследовании использовали моторное масло марки Mannol Semisynthetic Classic (Германия)по классификации ACEA A3/B4 с вязкостью 10W-40.

Морфологию MoS_2 изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN LYRA 3» (Чехия). Для оценки распределения частиц использовали прибор NICOMP 380 ZLS Zeta Potential/Particle Sizer (PSS.Nicomp, Santa Barbara, CA, USA).

Исследования молекулярных и структурных свойств проводились с помощью ИК спектроскопии на приборе Инфралюм ФТ-801 (ООО НПФ "Люмэкс-Сибирь", г. Новосибирск, Россия).

Для исследований массовая концентрация MoS_2 в моторном масле менялась от 0,03 до 0,07 с шагом 0,02 мас.%. Использование диапазона меньших значения концентраций дисперсных материалов основано на том факте, что система фильтрации ДВС по масляному тракту обеспечивает эффективную фильтрацию, а увеличение концентрации приводит только к загрязнению фильтров и может снизить пропускную способность масляных каналов в ДВС.

В работе на машине трения МИ-1М (Россия) исследовались, такие трибологические показатели, как:

- время приработки , ч;
- приработочный износ;
- коэффициент трения в конце испытаний f.

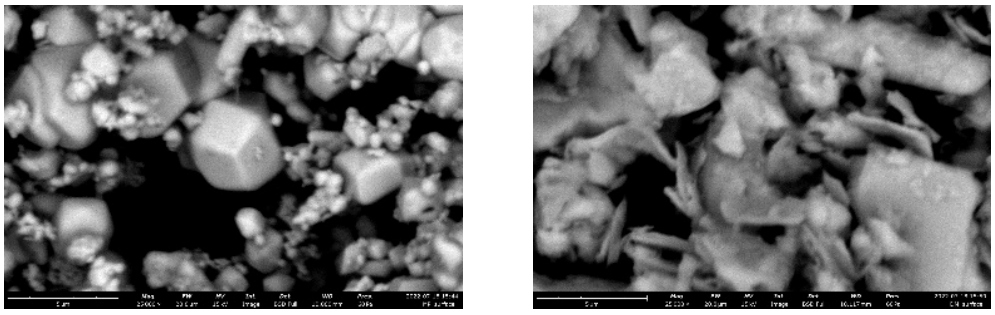
Усилие нагружения 70 МПа ± 0,5 %. Анализируемый образец выполнен из стали 45 (ГОСТ 1050-2013). Для индентора использован сплав ВК8. Общее время исследований образца – 3 ч.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 a и b показано СЭМ MoS_2 до и после механоактивации.

Из анализа рисунка 1 (a и b) следует, что в процессе механоактивации морфология дисульфида молибдена претерпевает существенные изменения. Образец становится слоистым, что является оптимальным для процесса смазки, так как слоистые структуры способны встраиваются в плоскость трения. Представленная на рисунке 1 (b) морфология является оптимальной с точки зрения обеспечения снижения трения в механических узлах ДВС. При этом, распределение частиц по геометрическим размерам в объеме моторного масла определяет эффективность трибологических свойств в целом.

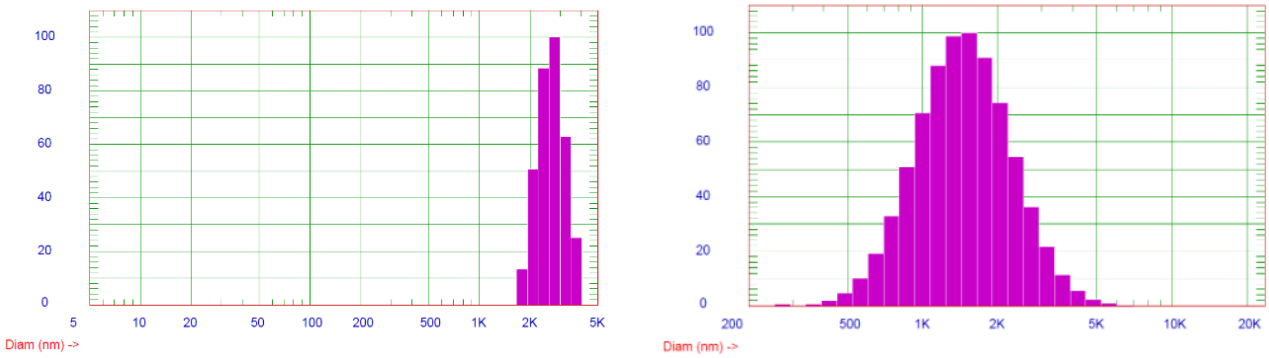
На рисунке 2 a и b представлено распределение частиц MoS_2 по размерам.



a b

Рис. 1 – СЭМ MoS_2 (a) до; (b) и после механоактивации

Fig. 1 – SEM of MoS_2 before (a) and after (b) mechanoactivation



a b

Рис. 2 – Распределение частиц по размерам: (a) до; (b) и после механоактивации

Fig. 2 – Particle size distribution: before (a) and after (b) mechanoactivation

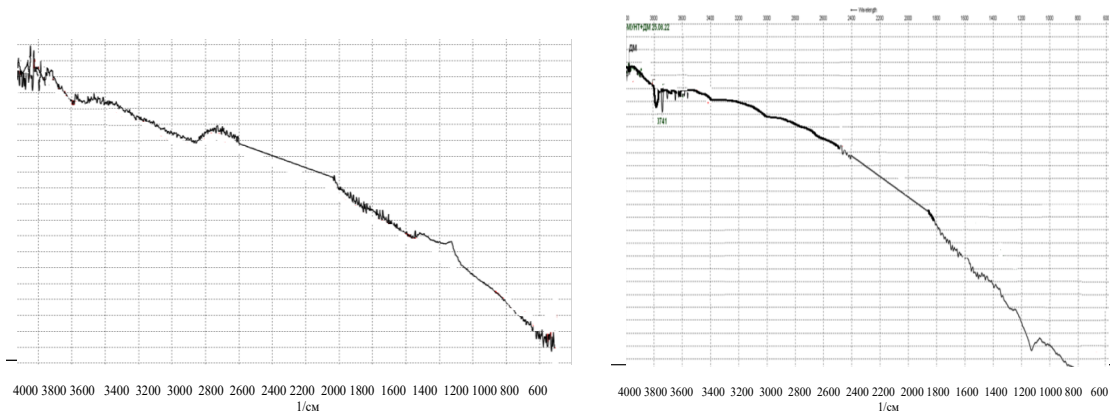
На основании рисунка 2 (a и b) следует, что механоактивация влияет на гранулометрический состав присадки MoS_2. Благодаря чему происходит изменение размера отдельных частиц MoS_2 с преобладанием частиц имеющие размеры от 500 нм до 5 мкм. Также существуют частицы с размерами в диапазоне от 1 до 2 мкм (рис.2 (b)), что является более оптимальным для системы фильтрации, чем при размере частиц в узком диапазоне (от 2 до 5 мкм) и максимальным распределением при 3 мкм, что согласуется с результатами работы [22].

На рисунке 3 (a и b) показаны ИК спектры MoS_2 до и после механоактивации.

На рис. 3a и b представлены спектральные данные ИК для образцов в диапазоне от 4000 до 400 см $^{-1}$. Проявление пика при 670 см $^{-1}$ (рис. 3 b) связано с валентными колебаниями в структуре связей MoS_2 [25]. Кроме того, после механоактивации MoS_2 появились интенсивные пики при 3741 см$^{-1}$ и 1184 см$^{-1}$(рис. 3 b), относящиеся к валентным и деформационным колебаниям связей, что может усиливать смачиваемость поверхности MoS_2 [25].

В таблице 1 приведены значения трибологических параметров, определенные по результатам испытаний моторного масла с MoS_2.

Результаты исследований показали, что оптимальное значение присадки является 0,05 мас.%. Дальнейший рост концентрации не приводил к существенному улучшению свойств моторного масла. Приработанный износ уменьшается с 5,7 до 4,1 мкм. Установившийся коэффициент трения изменяется от 0,115 до 0,08.



a b

Рис. 3 – Инфракрасные спектры дисульфида молибдена(a) до; (b) и после механоактивации

Fig. 3 – Infrared spectra of molybdenum disulfide before (a) and after (b) mechanoactivation

Таблица 1 – Сравнительные трибологические показатели моторного масла с MoS_2

Table 1 – Comparative tribological parameters of engine oil with MoS_2

Трибологический показатель	Моторное масло MANNOL	Моторное масло MANNOL (Германия) с MoS_2		
		Массовая концентрация MoS_2, мас.%		
		0,03	0,05	0,07
1. Приработочный износ h_0, мкм	5,70	4,50	4,20	4,1
2. Установившийся коэффициент трения *f*	0,115	0,1	0,09	0,08
3. f_0/f	1,55	1,75	1,85	1,88
4. Износ *h*, мкм	8,40	7,90	7,80	7,70
5. Время приработки t_0, ч	1,57	1,88	1,98	2

Заключение

Механоактивация является универсальным технологическим процессом, что позволяет с одной стороны оптимизировать морфологические свойства MoS_2, а также эффективно ввести и распределить MoS_2 в моторном масле. Проведенные исследования показали, что морфологические и трибологические свойства механоактивированного MoS_2, используемого в качестве присадки для моторного масла, являются эффективными. Методом сканирующей микроскопии исследована структура и морфология, полученных материалов, а также произведена оценка распределения по размерам гранулометрического состава MoS_2. Проведен сравнительный анализ трибологических показателей моторного масла (время приработки, приработочный износ, отношение коэффициентов трения, установившийся коэффициент трения и суммарный износ). При этом массовая концентрация MoS_2 в моторном масле (Mannol Semi-synthetic Classic 10W-40), изменялась от 0,03 до 0,07 с шагом 0,02 мас.%. Установлено, что добавка в моторное масло MoS_2 уменьшает износ с 5,7 до 4,1 мкм, при снижении установившегося коэффициента трения с 0,115 до 0,08. Использование диапазона меньших значения концентраций MoS_2 основано на том факте, что система фильтрации ДВС по масляному тракту обеспечивает эффективную фильтрацию, а увеличение концентрации приводит только к загрязнению фильтров и может снизить пропускную способность масляных каналов в ДВС. Также следует учитывать накопительный эффект такой присадки как MoS_2, которая при постоянном использовании в моторном масле накапливается и может повторно включаться в состав моторного масла. При этом в процессе эксплуатации концентрация присадки MoS_2 в моторном масле снижается, что приводит к ухудшению свойств, так уменьшение концентрации с 0,07 до 0,03 (изменение на 57%) увеличит износ с 7,7 до 7,90 мкм, что составляет 2,5%, а при уменьшении концентрации с 0,07 до 0,05 увеличение износа - 1,2%. Таким образом учитывая факторы, связанные с фильтрацией, накопительным эффектом и значениями исследованных типологических параметров, оптимальным является концентрация MoS_2 в диапазоне 0,03 до 0,07 мас.%. Следует отметить, что эффект снижения трения при использовании MoS_2 связан со слоистостью структуры (определенный по результатам сканирующей микроскопии), а это позволяет в местах трения в дополнение к масляной пленке сформировать участки (пленки) с MoS_2. Эти пленки обладают прочностью так, как атомы серы притягиваются к металлу, а молекулярные слои легко скользят относительно друг друга с минимальным коэффициентом трения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке управления образования и науки Тамбовской области в рамках Соглашения №2/МУ2022 о предоставлении гранта по проекту

№МУ 2022-02/5 областного конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года».

Литература

1. Mohammed A.S., Atnaw S.M., Ramaya A.V., Alemayehu G. A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics // Journal of the Energy Institute. 2023. Vol. 108. P. 101227. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101227
2. Wang Y., Yang H., Liang X., Song H., Tao Z. Effect of metallic lubricant additives on morphology, nanostructure, graphitization degree and oxidation reactivity of diesel particles // Chemosphere. 2022. Vol. 306. P. 135588. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135588
3. Bojarska Z., Kopytowski J., Mazurkiewicz-Pawlicka M., Bazarnik P., Gierlotka S., Rożeń A., Makowski Ł. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties // Tribology International. 2021. Vol. 160. P. 106999. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106999
4. Thachnatharen N., Khalid M., Shahabuddin S., Anwar A., Sridewi N. Tribological analysis of advanced microwave synthesized Molybdenum disulfide (MoS_2) as anti-friction additives in diesel engine oil for military vehicles // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 62(13). P. 7243-7247. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.692
5. Yang Y., Fan X., Yue Z., Zhu M. Mechanism on heterogeneous transfer film formed by diamond-like carbon film under molybdenum disulfide hybrid polyethylene glycol lubrication // Carbon. 2023. Vol. 210. P. 118030. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118030
6. Makowski Ł., Bojarska Z., Rożeń A. Rheological Properties of Engine Oil with Nano-Additives Based on MoS_2 Materials // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. P. 581. DOI: 10.3390/nano12040581
7. Abate F., D'Agostino V., Di Giuda R., Senatore A. Tribological behaviour of MoS2 and inorganic fullerene-like WS2 nanoparticles under boundary and mixed lubrication regimes // Tribol Mater Surface Interfac. 2010. Vol. 4. P. 91-98. DOI: 10.1179/175158310X12678019274282
8. Srivastava I., Singh F., Kotia A., Ghosh S.K. MWCNT and graphene nanoparticles additives for energy efficiency in engine oil with regression modeling // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. P. 1-21.
9. Bojarska Z., Goławska W., Mazurkiewicz-Pawlicka M., Makowski Ł. Reducing particulate emissions by using advanced engine oil nanoadditives based on molybdenum disulfide and carbon nanotubes // Sci Rep. 2023. Vol. 13. P. 13621. DOI: 10.1038/s41598-023-39933-6
10. Penconek, A., Jackiewicz, A., & Moskal, A. Penetration of Diesel Exhaust Particles (DEPs) through Fibrous Filters Produced Using Melt-Blown Technology//KONA Powder and Particle Journal. 2015. Vol. 32(0) P. 184–195. doi:10.14356/kona.2015008
11. Tomala A.M., Ripoll M.R., Michalczewski R. Tribological synergy between classical ZDDP and innovative MoS_2 and MoO_3 nanotube additives at elevated temperatures // Proc Est Acad Sci. 2019. Vol. 68. P. 178-184. DOI: 10.3176/proc.2019.2.09
12. Dassenoy F. Nanoparticles as additives for the development of high performance and environmentally friendly engine lubricants // Tribol Online. 2019. Vol. 14. P. 237-253. DOI: 10.2474/trol.14.237
13. He Z., Que W. Molybdenum disulfide nanomaterials: structures, properties, synthesis and recent progress on hydrogen evolution reaction // Appl Mater Today. 2016. Vol. 3. P. 23-56. DOI: 10.1016/j.apmt.2016.02.001
14. Zhang Y., Li C., Jia D., Zhang D., Zhang X. Experimental evaluation of MoS2 nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil // J Clean Prod. 2015. Vol. 87. P. 930-940. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.027
15. Bojarska Z., Kopytowski J., Mazurkiewicz-Pawlicka M., Bazarnik P., Gierlotka S., Rożeń A., Makowski Ł. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties // Tribology International. 2021. Vol. 160. P. 106999. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106999
16. Renevier N.M., Hamphire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS2-based coatings // Surf Coating Technol. 2001. Vol. 142. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01108-2 67–7
17. Furlan K.P., de Mello J.D.B., Klein A.N. Self-lubricating composites containing MoS2: a review // Tribol Int. 2018. Vol. 120. P. 280-298. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.12.033
18. Xiong S., Liang D., Zhang B., Wu H., Mao X. Tribological behavior of mineral and synthetic ester base oil containing MoS_2 nanoparticles // Journal of Dispersion Science and Technology. 2019. Vol. 42(4). P. 493–502. DOI: 10.1080/01932691.2019.1700132
19. Yi M., Zhang C. The synthesis of MoS2 particles with different morphologies for tribological applications // Tribol Int. 2017. Vol. 116. P. 285-294. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.045
20. Koshy C.P., Rajendrakumar P.K., Thottackkad M.V. Evaluation of the tribological and thermo-physical properties of coconut oil added with MoS2 nanoparticles at elevated temperatures // Wear. 2015. Vol. 330(1). P. 228-308. DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.044
21. Гужвенко И.Н., Чанчиков В.А., Перекрестов А.П., Свекольников С.А., Бурмистрова О.В. Исследование влияния дисперсности слоистых модификаторов трения на противоизносные свойства смазочных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1-2. С. 187-192.
22. Горленко А.О., Шупиков И.Л., Прудников М.И. Эффективность применения дисульфида молибдена в качестве антифрикционного компонента смазочных масел // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 1(41). С. 18-22.
23. T.F. Babuska, B.A. Krick, N. Argibay, M.T. Dugger, M. Chandross, J.F. Curry,Revisiting the dwell effect on friction behavior of molybdenum disulfide//Wear. 2023. P. 526–527. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204876.
24. Shchegolkov, A., Albairmani, A., Al-Zahiwat, M., Zemtsova, N., Shchegolkov, A. Mathematical Model of the Mechanoactivation Process of Modibden Disulfide and Carbon Nanotubes Proceedings - 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2022, 2022, 122–124
25. Y. Li, X. Wang, M. Liu, H. Luo, L. Deng, et al. Molybdenum disulfide quantum dots prepared by bipolar-electrode electrochemical scissoring// Nanomaterials.2019. Vol. 9 DOI: 10.3390/nano9060906.

References

1. Mohammed A.S., Atnaw S.M., Ramaya A.V., Alemayehu G. A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics // Journal of the Energy Institute. 2023. Vol. 108. P. 101227. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101227
2. Wang Y., Yang H., Liang X., Song H., Tao Z. Effect of metallic lubricant additives on morphology, nanostructure, graphitization degree and oxidation reactivity of diesel

particles // Chemosphere. 2022. Vol. 306. P. 135588. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135588
3. Bojarska Z., Kopytowski J., Mazurkiewicz-Pawlicka M., Bazarnik P., Gierlotka S., Rożeń A., Makowski Ł. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties // Tribology International. 2021. Vol. 160. P. 106999. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106999
4. Thachnatharen N., Khalid M., Shahabuddin S., Anwar A., Sridewi N. Tribological analysis of advanced microwave synthesized Molybdenum disulfide (MoS_2) as anti-friction additives in diesel engine oil for military vehicles // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 62(13). P. 7243-7247. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.692
5. Yang Y., Fan X., Yue Z., Zhu M. Mechanism on heterogeneous transfer film formed by diamond-like carbon film under molybdenum disulfide hybrid polyethylene glycol lubrication // Carbon. 2023. Vol. 210. P. 118030. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118030
6. Makowski Ł., Bojarska Z., Rożeń A. Rheological Properties of Engine Oil with Nano-Additives Based on MoS_2 Materials // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. P. 581. DOI: 10.3390/nano12040581
7. Abate F., D'Agostino V., Di Giuda R., Senatore A. Tribological behaviour of MoS2 and inorganic fullerene-like WS2 nanoparticles under boundary and mixed lubrication regimes // Tribol Mater Surface Interfac. 2010. Vol. 4. P. 91-98. DOI: 10.1179/175158310X12678019274282
8. Srivastava I., Singh F., Kotia A., Ghosh S.K. MWCNT and graphene nanoparticles additives for energy efficiency in engine oil with regression modeling // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. P. 1-21.
9. Bojarska Z., Goławska W., Mazurkiewicz-Pawlicka M., Makowski Ł. Reducing particulate emissions by using advanced engine oil nanoadditives based on molybdenum disulfide and carbon nanotubes // Sci Rep. 2023. Vol. 13. P. 13621. DOI: 10.1038/s41598-023-39933-6
10. Penconek, A., Jackiewicz, A., & Moskal, A. Penetration of Diesel Exhaust Particles (DEPs) through Fibrous Filters Produced Using Melt-Blown Technology//KONA Powder and Particle Journal. 2015. Vol. 32(0) P. 184–195. doi:10.14356/kona.2015008
11. Tomala A.M., Ripoll M.R., Michalczewski R. Tribological synergy between classical ZDDP and innovative MoS_2 and MoO_3 nanotube additives at elevated temperatures // Proc Est Acad Sci. 2019. Vol. 68. P. 178-184. DOI: 10.3176/proc.2019.2.09
12. Dassenoy F. Nanoparticles as additives for the development of high performance and environmentally friendly engine lubricants // Tribol Online. 2019. Vol. 14. P. 237-253. DOI: 10.2474/trol.14.237
13. He Z., Que W. Molybdenum disulfide nanomaterials: structures, properties, synthesis and recent progress on hydrogen evolution reaction // Appl Mater Today. 2016. Vol. 3. P. 23-56. DOI: 10.1016/j.apmt.2016.02.001
14. Zhang Y., Li C., Jia D., Zhang D., Zhang X. Experimental evaluation of MoS_2 nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil // J Clean Prod. 2015. Vol. 87. P. 930-940. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.027
15. Bojarska Z., Kopytowski J., Mazurkiewicz-Pawlicka M., Bazarnik P., Gierlotka S., Rożeń A., Makowski Ł. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties // Tribology International. 2021. Vol. 160. P. 106999. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106999
16. Renevier N.M., Hamphire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS2-based coatings // Surf Coating Technol. 2001. Vol. 142. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01108-2 67–7
17. Furlan K.P., de Mello J.D.B., Klein A.N. Self-lubricating composites containing MoS_2: a review // Tribol Int. 2018. Vol. 120. P. 280-298. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.12.033
18. Xiong S., Liang D., Zhang B., Wu H., Mao X. Tribological behavior of mineral and synthetic ester base oil containing MoS_2 nanoparticles // Journal of Dispersion Science and Technology. 2019. Vol. 42(4). P. 493–502. DOI: 10.1080/01932691.2019.1700132
19. Yi M., Zhang C. The synthesis of MoS_2 particles with different morphologies for tribological applications // Tribol Int. 2017. Vol. 116. P. 285-294. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.045
20. Koshy C.P., Rajendrakumar P.K., Thottackkad M.V. Evaluation of the tribological and thermo-physical properties of coconut oil added with MoS2 nanoparticles at elevated temperatures // Wear. 2015. Vol. 330(1). P. 228-308. DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.044
21. Guzhvenko I.N., Chanchikov V.A., Perekrestov A.P., Svekolnikov S.A., Burmistrova O.V. Study of the influence of the dispersion of layered friction modifiers on the anti-wear properties of lubricants // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. Vol. 18. № 1-2. P. 187-192.
22. Gorlenko A.O., Shupikov I.L., Prudnikov M.I. Efficiency of using molybdenum disulfide as an antifriction component of lubricating oils // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2014. № 1(41). P. 18-22.
23.T.F. Babuska, B.A. Krick, N. Argibay, M.T. Dugger, M. Chandross, J.F. Curry,Revisiting the dwell effect on friction behavior of molybdenum disulfide//Wear. 2023. P. 526–527. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204876.
24. Shchegolkov, A., Albairmani, A., Al-Zahiwat, M., Zemtsova, N., Shchegolkov, A. Mathematical Model of the Mechanoactivation Process of Modibden Disulfide and Carbon Nanotubes Proceedings - 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2022, 2022, 122–124
25. Y. Li, X. Wang, M. Liu, H. Luo, L. Deng, et al. Molybdenum disulfide quantum dots prepared by bipolar-electrode electrochemical scissoring// Nanomaterials.2019. Vol. 9 DOI: 10.3390/nano9060906

© **М. М. А. Захиват** − аспирант кафедры «Электроэнергетика», Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), г. Тамбов, Россия, e-mail: chemical.eng85@gmail.com; **А. В. Щегольков –** кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ТГТУ, e-mail: energynano@yandex.ru; **Н. В. Земцова –** аспирант кафедры «Электроэнергетика», ТГТУ, e-mail: natasha_paramonova_68@mail.ru; **А. В. Щегольков** − кандидат технических наук, инженер кафедры «Электроэнергетика», ТГТУ, e-mail: alexxx5000@mail.ru; **В. А. Кобелева** − студент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы», Московской авиационный институт, г. Москва, Россия, e-mail: viktoriakobeleva2018@yandex.ru.

© **M. M. A. Zakhivat –** PhD-student, Department of Electrical Power Engineering (EPE), Tambov State Technical University (TSTU), Tambov, Russia, e-mail: chemical.eng85@gmail.com; **A. V. Shchegolkov –** PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the EPE department, TSTU, e-mail: energynano@yandex.ru; **N. V. Zemtsova –** PhD-student, the EPE department, TSTU, e-mail: natasha paramonova 68@mail.ru; **A. V. Shchegolkov** − PhD (Technical Sci.), Engineer, the EPE department, TSTU, e-mail: alexxx5000@mail.ru; **V. A. Kobeleva** − student, Department of Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia e-mail: viktoriakobeleva2018@yandex.ru.