УДК 620.3
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-3-103-110

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНОАКТИВАЦИИ MoS_2 и МУНТ ДЛЯ МОТОРНОГО ТОПЛИВА И МАСЛА

[1]Щегольков Александр Викторович
[1]Захиват Муртада Мохммед Аттья
[1]Земцова Наталия Викторовна
[1]Щегольков Алексей Викторович
[1]Скоморохова Анастасия Игоревна
[1]ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Реферат. *Добиться улучшения свойств мотрого топлива и масла можно путем использования нового поколения присадок, которые смогут улучшить целый ряд функциоанальных показателей. Повышение эффективности присадок может достигаться посредством как применения сочетаний разных видов присадок, обеспечивающих выполнение различных свойств, так и использованием новых эффектов реализуемых при переходе к наноразмерной форме. Так, к одним из наноразмерных материалов, которые могут быть использованы в сочетании с дисульфидом молибдена (MoS_2), относятся многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ). Введение MoS_2 и МУНТ в мотороное топливо и масло целесообразно организовать с применением комбинированного способа диспергирования и механоактивирования, которое может быть реализовано в аппаратах с вихревым электромагнитным полем. Такие аппараты позволяют осуществлять механическое воздействие за счет перемещения тел помола в переменном электромагнитном поле. Это обеспечивает разбиение агломератов в МУНТ и измельчение MoS_2, что повышает эффективность этих присадок и снижает их концуентрацию в мотороное топливо и масло. В работе представлено математическое описание протекания процесса механоактивации. Измельчение дисперсного материала представлено в виде матриц и приведено уравнения движения тел помола в вихревом слое. Описан принцип работы аппарата вихревого слоя (АВС) и рассмотрены электромагнитные процессы в обмотках статора АВС. Проведен анализ устройства терморегулирования АВС с неявно полюсным индуктором. Разработанное математическое описание процесса механоактивации моторного топлива и масла позволяет учитывать ряд факторов, оказывающих влияние на режимы работы установки для механоактивации.*

Ключевые слова: *аппараты вихревого слоя, механоактивация, дисульфид молибдена, моторное масло, дизельное топливо, углеродные наноструктуры, математическое моделирование.*

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS OF MECHANICAL ACTIVATION OF MoS_2 AND MWCNT FOR MOTOR FUEL AND OIL

[1]Shchegolkov Alexander
[1]Zahiwat Murtada Attya
[1]Zemtsova Natalia
[1]Shchegolkov Alexey
[1]Skomorokhova Anastasia
FGBOU VO "Tambov State Technical University"

Abstract. *It is possible to improve the properties of motor fuel and oil by using a new generation of additives that can improve a number of functional indicators. Increasing the efficiency of additives can be achieved through both the use of combinations of different types of additives that provide different properties, and the use of new effects realized during the transition to a nanoscale form. Thus, one of the nanoscale materials that can be used in combination with molybdenum disulfide (MoS_2) are multi-walled*

carbon nanotubes (MWCNTs). The introduction of MoS_2 and MWCNTs into motor fuel and oil is advisable to organize using a combined method of dispersion and mechanical activation, which can be implemented in devices with a vortex electromagnetic field. Such devices allow mechanical action by moving the grinding bodies in an alternating electromagnetic field. This breaks up agglomerates into MWCNTs and reduces MoS_2, which increases the effectiveness of these additives and reduces their concentration in motor fuel and oil. The paper presents a mathematical description of the process of mechanical activation. The grinding of a dispersed material is presented in the form of matrices and the equations of motion of a ferromagnetic particle in a vortex layer are given. The principle of operation of the vortex layer apparatus (VLA) is described and the electromagnetic processes in the stator windings of the VLA are considered. An analysis of the VLA thermal control device with an implicitly pole inductor was carried out. The developed mathematical description of the process of mechanical activation of motor fuel and oil makes it possible to take into account a number of factors that affect the operating modes of the installation for mechanical activation.

Keywords: *vortex layer devices, mechanical activation, molybdenum disulfide, motor oil, diesel fuel, carbon nanostructures, mathematical modeling*.

Введение. Доля дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) как в автотранспортной технике, так и системах электрогенерации достаточно высока, поэтому повышение срока и эффективности их эксплуатации является актуальной темой исследований. При этом эксплуатация дизельных ДВС сопровождается выбросами токсичных газов в окружающую среду [1]. Технология ресурсосбережения и повышения экологической эффективности транспортных средств основана на применении дизельного топлива и моторного масла с высокими удельными характеристиками, что в первую очередь связано с правильным подбором и сочетанием различных типов присадок. Присадки для дизельного топлива могут отличаются как свойствами, так и целевым назначением [2]. Следует отметить, возможность создания присадок для дизельного топлива на альтернативной основе биологического происхождения [3].

Высокую эффективность в качестве добавки в моторное масло показывает дисульфид молибдена (MoS_2). MoS_2 относится к классу эффективных химических элементов, которые могут быть использованы для улучшения свойств как моторного масла, так и дизельного топлива [4-5], в том числе биотоплива. В моторном масле массовая концентрации MoS_2 находится в диапазоне от 0,08 до 0,16 мас.% при размере частиц менее 0,5 мкм. MoS_2 при размере частиц менее 0,5 мкм эффективно прокачивается в системе фильтрации моторного масла с размером фильтрующих отверстий в пределах 15-25 мкм.

С целью улучшения свойств автомобильных нефтепродутов могут использоваться новые методы, основанные на практике и теории нанотехнологии [6, 7]. Авторы работы [8] проводили исследования по определению трибологических характеристик MoS_2 с помощью четырехшарикового триботестера. Коэффициент трения (COF) и средний диаметр следа износа (WSD) антифрикционных присадок были проанализированы посредством трибологических исследований скорости износа и следа износа на изношенной поверхности шарикоподшипников. Установлено, что наличие MoS_2 в смазке улучшает коэффициент трения и вязкость на 10,25 % и 10,6 % соответственно.

Наноразмерные добавки в моторное топливо могут способствовать снижению концентрации токсичных составляющих выхлопных газов и повышению мощности ДВС [9].

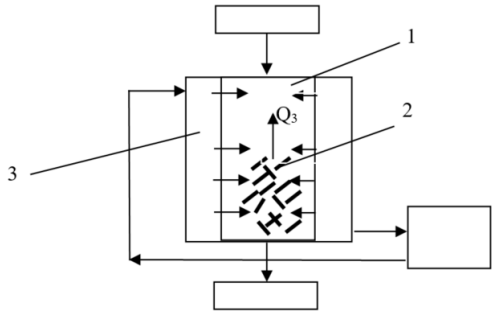
Адаптацию свойств дисперсных структур для различных нефтепродуктов можно осуществлять при использовании технологии механоактивации, которая позволяет повысить активность МУНТ при разбиении агломератов [10]. Механоактивация MoS_2 и МУНТ возможна, как в жидкости – топливе или моторном масле, так и в сухом состоянии с последующей стадией перемешивания [10].

Процессы механического воздействия сопровождаются тепловыми выделениями, и в этом отношении следует провести исследования распределения температурного поля при механической активации таких материалов, как MoS_2 и МУНТ. Эффективность применения MoS_2 показывает потенциальные возможности применения такой технологии [11].

Теоретические вопросы измельчения дисперсных материалов рассмотрены в работах [12,13]

Цель работы заключается в разработке математического описания процесса механоактивации MoS_2 и МУНТ в дизельном топливе и моторном масле.

Материалы и методы. Схема АВС (аппарат вихревого слоя) представлена на (рисунок 1). Для запуска АВС в рабочий режим запускают охлаждение индукторов 3, затем на них подают питающее трехфазное напряжение и одновременно подачу обрабатываемого продукта в рабочую камеру 1. Электромагнитное поле взаимодействуя на тела помола 2 интенсифицирует их движение совместно с измельчаемым материалом.



1 – труба; 2 – ферромагнитные частицы; 3 – индуктор (статор)

Рисунок 1 – АВС с неявнополюсным статором

Тела помола для АВС имеют вид стержней. Определение необходимой массы и геометрических параметров тел помола могут использоваться наработки, представленные в исследованиях [13].

Рабочая зона АВС имеет вид цилиндра, в которой наводится вращающееся электромагнитное поле, воздействующее на тела помола. В процессе взаимодействия электромагнитного поля с телами помола реализуются различные процессы и в том числе появляются акустические эффекты в ультразвуковом диапазоне частот, а также формируется тепловое поле, которое совместно с механическими процессами активно воздействует на диспергируемый материал - тем самым обеспечивая изменение его исходных физико-химических свойств.

Основной задачей АВС является измельчение дисперсной структуры в управляемом режиме. Для оценки эффективности измельчения необходимо использовать системный подход - при котором можно выявить факторы, влияющие на протекание процесса измельчения.

В работах [12, 13] процесс измельчения дисперсного материала описан в виде матриц. Материальный баланс для диспергируемой системы имеет вид:

$$\sum_j^m M_j = M, \tag{1}$$

где M_j – масса фракции j MoS_2 и МУНТ, кг; M – общая масса MoS_2 и МУНТ, кг.

Поделив уравнение (1) на M, получим

$$\sum_j^m f_j = 1, \tag{2}$$

где безразмерные величины $f_j = M_j/M$ образуют нормированное распределение частиц по размерам.

Вектор-столбец распределения частиц по размерам, имеет вид:

$$\mathbf{f} = [f_i] = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Матрица измельчения **P** с (p_{kj}) позволяет оценить значение не механоактивированного состава j MoS_2 и МУНТ, переходящего после механоактивации в состояние с меньшими размерами MoS_2 и МУНТ:

$$\mathbf{P} = \left[p_{kj}\right] = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ p_{21} & p_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & p_{m3} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Используя селективную **S** и распределительную **B** функции [13], можно получить выражение:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I} - \mathbf{S}) + \mathbf{BS}, \quad (5)$$

где **I** – единичная матрица; **S** – диагональная матрица вероятностей измельчения; **B** – матричное выражение для распределительной функции измельчения.

Параметры выражения (7) в матричной форме:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & S_m \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{m,m-1} & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

По данным представленным в работе [14] движение тел помола в вихревом слое АВС описывается следующими уравнениями:

$$m \cdot \left(r^n - r \cdot \varphi^2\right) = F_r \cdot \left(1 - \frac{K}{K_{кр}}\right) \cdot n_1, \quad (9)$$

$$\frac{m}{r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \left(r^2 \cdot \varphi\right) = F_\varphi \cdot \left(1 - \frac{K}{K_{кр}}\right) \cdot n_2, \quad (10)$$

где F_r, F_φ, M – постоянные величины, характеризующие максимальное значение сил и моментов; K – коэффициент заполнения рабочей камеры телами помола; n_1, n_2 – случайные функции, подчинённые нормальному закону распределения; m – математическое ожидание радиальной составляющей скорости частицы; φ – угол между вектором магнитного момента частицы и вектором напряжённости магнитного поля; r – расстояние от центра расточки индуктора; $K_{кр}$ – суммарный электромагнитный момент, действующий на тела помола, равен их сумме:

$$Mr = Ma + Mb + Mc. \quad (11)$$

где Ma, Mb, Mc – вращающие моменты фаз a, b, c ротора.

В работе [14] дано описание движения тел помола, при котором их пространственное изменение положения носит хаотический характер с сооударениями между собой, стенками

рабочей камеры при постоянном взаимодействием с измельчаемым материалом. Для оценки параметров электромагнитного поля индуктора (статора) рассмотрим электрическую схему на рисунке 2а, которая включает три ветви, два узла и три контура.

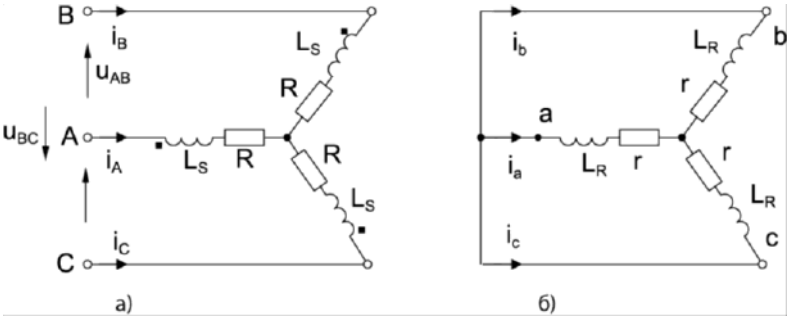


Рисунок 2 – Схемы обмоток: (а) статора; (б) ротора.

Для описания электромагнитных процессов в обмотках статора (индуктора) ABC использовано уравнение, записанное на основе первого закона Кирхгофа:

$$i_A + i_B + i_C = 0, \tag{12}$$

Дифференциальные уравнения для всех трех контуров обмоток ABC.

$$\begin{aligned} e_A &= -\frac{d}{dt}\cdot\left(M_{Aa}i_a + M_{Ab}i_b + M_{Ac}i_c\right), \\ e_B &= -\frac{d}{dt}\cdot\left(M_{Ba}i_a + M_{Bb}i_b + M_{Bc}i_c\right), \\ e_C &= -\frac{d}{dt}\cdot\left(M_{Ca}i_a + M_{Cb}i_b + M_{Cc}i_c\right), \end{aligned} \tag{13}$$

где M_{qk} — взаимоиндуктивность обмотки фазы q статора и обмотки фазы k ротора ($q = A, B, C$; $k = a, b, c$);

На следующем этапе проведем анализ устройства охлаждения аппарата вихревого слоя с неявно полюсным индуктором. Схема теплового баланса показана на (рисунок 3).

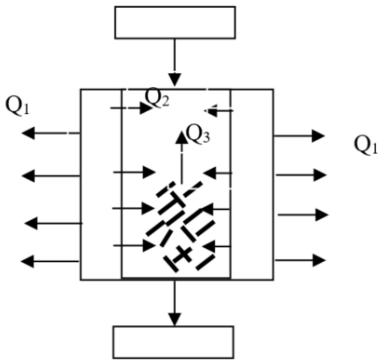


Рисунок 3 – Схема ABC с неявно полюсным индуктором для составления теплового баланса

Рассмотрим тепловой баланс для аппарата механоактивации, при этом условимся, что распределение температуры в объёме аппарата – равномерное. Пусть изменение температуры происходит за время $d\tau$ на величину dT. Тепловая энергия в рассматриваемом объеме аппарата увеличивается от $T_ж$ до $T_ж+dT_ж$.

Дифференциальные уравнения, описывающие теплообмен в АВС имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\rho_{т.п.}C_{т.п.}h_{т.п.}F_{т.п.}\frac{dT_{т.п.}}{d\tau}=\left(P_{эф}+P_a\right)-K_{1-2}F_1\left(T_{т.п.}-T_ж\right)-K_1F_{11}\left(T_{т.п.}-T_{ст.апп}\right);\\
&\rho_а C_а h_а F_а\frac{dT_а}{d\tau}=K_{1-2}F_1\left(T_{т.п.}-T_ж\right)-K_{2-3}F_2\left(T_{ст.апп}-T_ж\right);\\
&\rho_ж C_ж V_ж\frac{dT_ж}{d\tau}=K_{2-3}F_2\left(T_{ст.апп}-T_ж\right)-K_3F_2\left(T_ж-T_{окр}\right);\\
&\text{начальные условия}:\tau>0;\ T_{т.п.}=T_ж=T_a=+20°\text{C};\ T\equiv T\left(\tau\right);\\
&\textit{параметры варьирования}:P_а;\ P\equiv P\left(T\right)
\end{aligned}\right\}\qquad(14)$$

где $F_{тел.п.}$, $F_{ст.апп}$, $F_{нар.ст}$, $F_{дисп.мат}$,– площади тел помола, стенок аппарата, диспергируемого материала, м^2; $P_{эф.}$, $P_{а.}$ – тепловой эффект возникающий при трении и соударении тел помола и от обмоток аппарата, Вт; $T_{т.п.}$, $T_а$, $T_ж$, $T_{окр}$ – температура тел помола, аппарата, жидкости и окружающей среды, °С; $C_{т.п.}$, $C_а$, $C_ж$ – теплоемкость тел помола, аппарата, жидкости, Дж/(кг·°С); K_{1-2}, K_{2-3}, K_1,– коэффициенты теплопередачи от тел помола к жидкости, от жидкости стенкам аппарата, от стенок аппарата в окружающую среду, , Вт/(м^2·°С); $\rho_{т.п.}$, $\rho_а$, $\rho_ж$ – плотности материала тел помола, аппарата и жидкости, кг/м^3; $h_{т.п.}$, $h_а$ – высоты внутренней камеры аппарата и тел помола, м; $V_ж$ – объем жидкости, м^3; τ – время, с.

Результаты и их обсуждение. Разработана методика математического моделирования, которая учитывает процессы диспергирования MoS_2 и МУНТ, а также конструктивные параметры АВС с неявно полюсным индуктором. Механоактивация обеспечивает разбиение агломератов в МУНТ и измельчение MoS_2, что повышает эффективность этих присадок и снижает их концуентрацию в мотороное топливо и масло. Измельчение дисперсного материала представлено в виде матриц и приведено уравнения движения тел помола в вихревом слое. Описан принцип работы аппарата вихревого слоя (АВС) и рассмотрены электромагнитные процессы в обмотках статора АВС. Проведен анализ устройства терморегулирования АВС с неявно полюсным индуктором. Разработанное математическое описание процесса механоактивации моторного топлива и масла - позволяет учитывать ряд факторов, оказывающих влияние на режимы работы установки для механоактивации.

Заключение. Предложенное математическое описание процесса механоактивации дизельного топлива и моторного масла может быть использовано для учета некоторых факторов, оказывающих влияние на работу установки для механоактивации. Это позволит повысить эффективность распределения MoS_2 и МУНТ в дизельном топливе и моторном масле, тем самым обеспечивая улучшение их качества.

Список литературы

1. Данилов А. М. Новый взгляд на присадки к топливам (Обзор) // Нефтехимия. – 2020. – Т. 60. – № 2. – С. 163-171. – DOI 10.31857/S0028242120020033.

2. Impact of additives on Combustion, performance and exhaust emission of biodiesel fueled direct injection diesel engine / M. Nagappan, A. Devaraj, J. M. Babu [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – DOI 10.1016/j.matpr.2022.04.114.

3. A critical investigation on viscosity and tribological properties of molybdenum disulfide nano particles on diesel oil / P. Ramesh, G. S. Krishnan, J. P. Kumar [et al.] // Materials Today: Proceedings, Chennai, 20–22 April 2020. – Chennai, 2020. – P. 1830-1833. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.10.718.

4. A critical investigation on viscosity and tribological properties of molybdenum disulfide nano particles on diesel oil / P. Ramesh, G. S. Krishnan, J. P. Kumar [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 43. – P. 1830-1833. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.10.718.

5. Tomar M., Kumar N. Effect of multi-walled carbon nanotubes and alumina nano-additives in a light duty diesel engine fuelled with schleichera oleosa biodiesel blends // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2020. – Vol. 42. – P. 100833. – DOI 10.1016/j.seta.2020.100833.

6. Tribological analysis of advanced microwave synthesized Molybdenum disulfide (MoS2) as anti-friction additives in diesel engine oil for military vehicles / N. Thachnatharen, M. Khalid, S. Shahabuddin [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – DOI 10.1016/j.matpr.2022.03.692.

7. Hatami M., Hasanpour M., Jing D. Recent developments of nanoparticles additives to the consumables liquids in internal combustion engines: Part I: Nano-fuels // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 318. – P. 114250. – DOI 10.1016/j.molliq.2020.114250.

8. Анализ тепловых процессов при механоактивации MoS2 и МУНТ / А. С. Щегольков, М. М. А. Захиват, Н. В. Земцова, А. В. Щегольков // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83. – № 4(90). – С. 290-294. – DOI 10.20914/2310-1202-2021-4-290-294.

9. Щегольков А. В. Многоступенчатая механоактивация МУНТ для улучшения перколяционных переходов в системе эластомер/МУНТ: подходы для реализации и практика модификации эластомеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 58-67.

10. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties / Z. Bojarska, J. Kopytowski, M. Mazurkiewicz-Pawlicka [et al.] // Tribology International. – 2021. – Vol. 160. – P. 106999. – DOI 10.1016/j.triboint.2021.106999.

11. Математическая модель процесса измельчения / С.М. Техов, С.И. Шишкин, М.Д. Барский, И.И. Брод // Межвуз. сб. науч. тр. Техника и технология сыпучих материалов. – Иваново, 1991. – С. 29-32.

12. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. – ISPEU Press, 1997. – 108 p.

13. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – Киев: Издательство «Техніка», 1976. – 144 с.

References

1. Danilov A. M. Novyj vzgljad na prisadki k toplivam (Obzor) // Neftehimija. – 2020. – T. 60. – No. 2. – P. 163-171. – DOI 10.31857/S0028242120020033.

2. Impact of additives on Combustion, performance and exhaust emission of biodiesel fueled direct injection diesel engine / M. Nagappan, A. Devaraj, J. M. Babu [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – DOI 10.1016/j.matpr.2022.04.114.

3. A critical investigation on viscosity and tribological properties of molybdenum disulfide nano particles on diesel oil / P. Ramesh, G. S. Krishnan, J. P. Kumar [et al.] // Materials Today: Proceedings, Chennai, 20–22 April 2020. – Chennai, 2020. – P. 1830-1833. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.10.718.

4. A critical investigation on viscosity and tribological properties of molybdenum disulfide nano particles on diesel oil / P. Ramesh, G. S. Krishnan, J. P. Kumar [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 43. – P. 1830-1833. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.10.718.

5. Tomar M., Kumar N. Effect of multi-walled carbon nanotubes and alumina nano-additives in a light duty diesel engine fuelled with schleichera oleosa biodiesel blends // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2020. – Vol. 42. – P. 100833. – DOI 10.1016/j.seta.2020.100833.

6. Tribological analysis of advanced microwave synthesized Molybdenum disulfide (MoS2) as anti-friction additives in diesel engine oil for military vehicles / N. Thachnatharen, M. Khalid, S. Shahabuddin [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – DOI 10.1016/j.matpr.2022.03.692.

7. Hatami M., Hasanpour M., Jing D. Recent developments of nanoparticles additives to the consumables liquids in internal combustion engines: Part I: Nano-fuels // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 318. – P. 114250. – DOI 10.1016/j.molliq.2020.114250.

8. Analiz teplovyh processov pri mehanoaktivacii MoS2 i MUNT / A. S. Shhegol'kov, M. M. A. Zahivat, N. V. Zemcova, A. V. Shhegol'kov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tehnologij. – 2021. – T. 83. – No. 4(90). – P. 290-294. – DOI 10.20914/2310-1202-2021-4-290-294.

9. Shhegol'kov A. V. Mnogostupenchataja mehanoaktivacija MUNT dlja uluchshenija perkoljacionnyh perehodov v sisteme jelastomer/MUNT: podhody dlja realizacii i praktika modifikacii jelastomerov // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2021. – T. 19. – No. 2. – P. 58-67.

10. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties / Z. Bojarska, J. Kopytowski, M. Mazurkiewicz-Pawlicka [et al.] // Tribology International. – 2021. – Vol. 160. – P. 106999. – DOI 10.1016/j.triboint.2021.106999.

11. Matematicheskaja model' processa izmel'chenija / S.M. Tehov, S.I. Shishkin, M.D. Barskij, I.I. Brod // Mezhvuz. sb. nauch. tr. Tehnika i tehnologija sypuchih materialov. – Ivanovo, 1991. – P. 29-32.

12. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. – ISPEU Press, 1997. – 108 p.

13. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. Intensifikacija tehnologicheskih processov v apparatah s vihrevym sloem. – Kiev: Izdatel'stvo «Tehnika», 1976. – 144 p.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Щегольков Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: energynano@yandex.ru.

Захиват Муртада Мохммед Аттья – студент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов.

Земцова Наталия Викторовна – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов.

Щегольков Алексей Викторович – исследователь Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов.

Скоморохова Анастасия Игоревна – магистрант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: nasta373@mail.ru.

Author credentials
Affiliations

Shchegolkov Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal StateFunded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: energynano@yandex.ru.

Zahivat Murtada Mohmmed Attya is a student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov.

Zemtsova Natalia Viktorovna – post-graduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Russia, Tambov.

Shchegolkov Aleksey Viktorovich – researcher of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov.

Skomorokhova Anastasia – master's student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, email: nasta373@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 23.05.2022 Принята к публикации (Accepted): 25.05.2022