

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
ПИИЦ (Russia) = 0.126  
ESJI (KZ) = 9.035  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

### International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2021 Issue: 06 Volume: 98

Published: 01.06.2021 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



**Alexander Vasilievich Kozhemyachenko**

ISOP (branch) of DSTU in Shakhty

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «ATTO»

**D.N. Lyubimov**

LLC IC «Lik»

Candidate of Technical Sciences Associate Professor

Surgut

**I.F. Pustovoy**

LLC «Intech»

St. Petersburg

## PARTICLE OF FRICTION GEOMODIFIER IN AQUATIC MEDIUM

**Abstract:** The work is devoted to the study of the influence of viscous lubricants on sediment deposition of mechanical impurities and geomodifiers introduced into the lubricant as functional additives, it is shown that a viscous medium weakens the process of sediment formation, but at the same time affects the mechanical activation of the friction surface and the formation of protective antifriction layers.

**Key words:** friction geomodifiers, serpentine, viscosity, lubricating medium, sedimentation, mechanical activation, additive.

**Language:** Russian

**Citation:** Kozhemyachenko, A. V., Lyubimov, D. N., & Pustovoy, I. F. (2021). Particle of friction geomodifier in aquatic medium. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 06 (98), 6-10.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-06-98-2> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2021.06.98.2>

**Scopus ASCC:** 1600.

### ЧАСТИЦА ГЕОМОДИФИКАТОРА ТРЕНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

**Аннотация:** Работа посвящена исследованию вопроса влияния вязких смазочных средств на выпадение осадка механических примесей и геомодификаторов введенных в смазку в качестве функциональных добавок, показано, что вязкая среда ослабляет процесс образования осадка, но в то же время влияет на механоактивацию поверхности трения и формирования защитных антифрикционных слоев.

**Ключевые слова:** геомодификаторы трения, серпентин, вязкость, смазочная среда, седиментация, механоактивация, присадка.

#### Введение

Эффективность включения в смазочную композицию дисперсных наполнителей на основе минерального сырья, такого как серпентин, внешняя простота их практического применения сделала их использование достаточно популярным направлением в современной триботехнике [1;2]. Однако тщательное изучение фрикционных процессов, сопровождающих использование минеральных модификаторов трения (ММТ) обнаружил достаточный сложный

механизм их влияния, как на смазочный материал, в который вводится ММТ, так и на фрикционные характеристики угла трения.

Как было показано в работах [3;4], сами частицы ММТ не обладают достаточными антифрикционными характеристиками, но образуя сильную адгезионную связь с металлической поверхностью трения формируют устойчивый смазочный клин, обеспечивающий высокие трибохимические свойства угла трения. По сути ММТ имеет вид многофазной

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
РИИЦ (Russia) = 0.126  
ESJI (KZ) = 9.035  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

гетерогенной малоцентрированной свобододисперсной системы, компоненты которой обладают определенной степенью совместимости. Причем ММТ оказывает влияние на геологические характеристики смазочного материала [5].

Добавление в базовое масло присадки ММТ приводит к изменению её вязкости (как правило, увеличению). Увеличение вязкости представляется нежелательным эффектом, особенно в процессе пуска, т.к. последней в данном случае, сопровождается излишними потерями мощности. Тем не менее, оценивая влияние ММТ на свойство масел можно сделать вывод о том, что введение ММТ в смазочный материал повышает долговечность последнего. Интересно отметить, что кинетическая совместимость является свойством системы находится в состоянии метастабильного равновесия, регулируемого электрическим взаимодействием компонентов, протекание процессов адсорбации, диффузии и химических реакций между компонентами трибосистемы. Термодинамические совместимые компоненты при определенных условиях могут быть не совместимы кинетически, что может привести к коалесценции и выпадению одного из них в осадок. Для выхода из этой ситуации в составы дисперсных систем ММТ с целью стабилизации вводят ПАВ, а также повышают дисперсность частиц ММТ.

С диспергированием минеральных частиц увеличивается и удельная поверхность, соответственной растёт и поверхностная энергия, определяющая и физико-химическую активность при измельчении минеральных материалов оптимальную дисперсность устанавливают опытным путём. При отклонении от этих размеров, энергетическая активность поверхности настолько возрастает, что происходит самопроизвольное агрегирование частиц с появлением комкованности и соответственно уменьшением их удельной поверхности и однородности, приводящее к снижению поверхностной активности и ухудшению триботехнических свойств смазочного материала [1].

Главным условием седиментационной устойчивости является малый размер частиц, при котором действие сил тяжести не может преодолеть стремления частиц к равномерному распределению по всему объёму, зажатому дисперсной средой. При этом характерный размер частицы (в приближении её шарообразности) задается радиусом  $r$ . Данный параметр характеризует распределение частиц в приближении монодисперсной системы при которой можно определить при задаваемых параметрах относительную скорость накопления

осадка их требуемый размер, соответствующий  $\vartheta$  [1]:

$$\vartheta = \left( \frac{9\eta \cdot H}{2g(\rho - \rho_0)t} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где  $\eta$  - вязкость среды,  $H$  – расстояние, на котором изначально находились  $\rho, \rho_0$  – плотность частиц дисперсной среды и собственно среды, соответственно,  $t$  – время седиментации.

Из соотношения (1) становится очевидным два возможных варианта уменьшения скорости седиментации: уменьшение размера частиц дисперсной фазы. Если последний способ связан с выбором способов размолла частиц с весьма неоднозначным и итоговым результатом [8], то уменьшение плотности дисперсионной фазы, а следовательно и разности плотностей в формуле (1), решается переводом частиц ММТ из состояния механической взвеси в коллоидную форму. Однако такое решение требует дополнительной смазки.

### Постановка задачи и цели работы

Рассмотрим взаимодействие отдельной частицы ММТ с поверхностного трения. Как это было показано в работах [1-4], такие частицы могут упруго отражаться от поверхности трения или в результате пластической деформации последней закрепляться на ней, образуя очаги будущего слоя фрикционного переноса. То есть, если величина кинетической энергии частицы ММТ, определяемая её скоростью, достаточно велика, то этой величины оказывается достаточно для пластической деформации поверхности, ее механоактивации и образование сильных адгезионных связей между материалами поверхности и частицей, что необходимо для образования слоя фрикционного переноса, ответственного за фрикционные характеристики трибосопряжения [6]. Наличие же вязкой среды, препятствующей выпадению частиц ММТ в осадок неизбежно в соответствии с выражением (1) приводит к уменьшению кинетической энергии частиц ММТ, а следовательно и к замедлению процесса формирования слоя фрикционного переноса. Таким образом, создание вокруг частиц ММТ вязкого слоя влечет за собой двойной процесс, с одной стороны улучшающий реологические характеристики смазочной композиции включающей ММТ, а с другой стороны пассивирует механоактивацию поверхности трения, вызываемую взаимодействием отдельных частиц ММТ с поверхностью трения. Поэтому возникает необходимость проанализировать данные фактически перекрестные процессы с целью нахождения оптимума свойств смазочных композиций включающих в себя ММТ.

### Теоретическая модель.

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
 GIF (Australia) = 0.564  
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
 ПИНЦ (Russia) = 0.126  
 ESJI (KZ) = 9.035  
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
 PIF (India) = 1.940  
 IBI (India) = 4.260  
 OAJI (USA) = 0.350

Рассмотрим движение частицы массы  $m$ , имеющую шарообразную форму радиусом  $r$  в некой вязкой среде, которая определяется заданием некоего условного параметра  $\beta$ . Сила сопротивления, действующая на частицу со стороны среды в соответствии с законами классической физики оказывается пропорциональной скорости данной частицы [7]. Тогда можно записать в дифференциальной форме уравнение второго закона Ньютона, описывающего движение такой частицы:

$$m\ddot{x}_1 - \beta\dot{x}_1 = m\ddot{x}_2 \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы,  $\dot{x}_1, \ddot{x}_1$  – исходная скорости ускорения частицы ММТ,  $\ddot{x}_2$  – ускорение которое приобретает частицы ММТ в результате взаимодействия с вязкой средой

В результате действия на частице со стороны внешней среды силы  $\beta\dot{x}_1$  происходит её торможение, вследствие которого скорость частицы уменьшается до  $\dot{x}_2$ , что можно задать уравнением:

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_1 \exp(-\alpha t), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – параметр определяющий скорость частица,  $t$  – время

Продифференцировав  $\dot{x}_2$  из уравнения (3) по времени и подставив результат в силовое уравнение (2) получаем:

$$m\ddot{x}_1 [1 - \exp(-\alpha t)] = \dot{x}_1 [\beta - \alpha \exp(-\alpha t)], \quad (4)$$

которое легко преобразуется к виду:

$$\ddot{x}_1 [1 - \exp(-\alpha t)] = \dot{x}_1 [\beta m - 1 - \alpha \exp(-\alpha t)] \quad (5)$$

Используя известное приближение вида  $\exp(-\alpha t) = 1 - \alpha t$  приходим к уравнению вида:

$$\ddot{x}_1 = \dot{x}_2 [\beta \alpha - 1 - m - 1 - t - 1 + \alpha] \quad (6)$$

Если ввести новую переменную  $y = \dot{x}_1$ , то уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\ln(yt - \gamma) = \alpha t \quad (7)$$

где  $\gamma = 0.5 \beta m^{-1} - 1$ ,

или

$$y = y_0 t \gamma \exp(\alpha t) \quad (8)$$

где  $y_0$  – размерная постоянная интегрирования

Определим физический смысл параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , входящих в уравнения (2-8)

Легко видеть что, несмотря на то, что  $\alpha$  и  $\beta$  являются характеристиками вязкостных свойств среды – это разные по физическому смыслу величины, имеющие различные размерности  $c^{-1}$  и  $кг \cdot c^{-1}$  соответственно. Из уравнения (1), записанного в допредельной форме:

$$ma_1 - \beta v_1 = ma_2 \quad (9)$$

где  $a_1 = v_1/t$ ,  $a_2 = (v_2 \cdot v_1)/t$  – ускорение, а  $V_1, V_2$  – скорости частицы  $m$ , можно получить уравнение связи между параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ .

$$\alpha = \frac{m - \beta t}{m t} \quad (10)$$

В то же время из уравнения Стокса для силы сопротивления движению частиц в вязкой среде [7;8] вытекает, что:

$$\beta = 6\pi\eta r, \quad (11)$$

где  $\eta$  – вязкость среды,  $r$  – радиус тела массы  $m$ .

Из уравнения (9) можно получить выражение для соотношения скоростей  $V_1$  и  $V_2$  движения частицы в вязкой среде

$$V_2 = V_1 \exp\left(-\frac{\beta t}{m}\right)$$

Которая с учётом (11) принимает вид:

$$V_2 = V_1 \exp\left(-\frac{6\pi\eta r}{m} t\right) \quad (12)$$

Поскольку уравнение (12) по своей сути эквивалентно выражению (3), что позволяет уточнить физический смысл величины  $\alpha$  введенной нами ранее:

$$\alpha = \frac{6\pi\eta r}{m} \quad (13)$$

которое связано с вязкостью среды и параметрами частицы геомодификаторов: массой и размером. Необходимо отметить, что в уравнениях (3-8, 12) присутствует время выпадения осадков  $t$ , которое нуждается в доопределении.

Необходимо вспомнить, что процессы трения представляют собой физическое явление, сопровождаемое генерированием тепловых потоков. При этом время  $t$  возможно выразить из закона Ньютона для теплопередачи [9].

$$t = \frac{\Delta Q_1}{\lambda \Delta T S} \quad (14)$$

где  $\Delta Q_1$  – количество теплоты, образуемое в процессе теплопередачи  $\pi$  – коэффициент теплопроводности  $s$  – площадь поверхности, через которую происходит теплопередача.

Подставим значение для определения времени  $t$  (14) соотношение (13):

$$\alpha t = \frac{6\pi\eta r \Delta Q_1}{m \Delta T \lambda S} \quad (15)$$

Считая, что частицы геомодификатора находятся в тепловом равновесии с вязкой средой, в которой происходит их движение, можно выразить температуру  $\Delta T$  и массу частицы через теплоемкость  $C$  и теплоту аккумулируемую частицей геомодификатора  $\Delta Q_2$ .

$$\alpha t = \frac{6\pi\eta r}{s} \frac{C}{\lambda} \frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} \quad (16)$$

Поскольку, в нашем приближении частицы имеют шарообразную форму, то уравнение (16) преобразуется к виду:

$$\alpha t = 1,5 \frac{\pi}{r} \frac{C}{\lambda} \frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} \quad (17)$$

Отношение  $\frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2}$  входящее в уравнение (17) близко по физическому смыслу к коэффициенту распределения тепловых потоков  $k$  – безразмерной величиной показывающей, какая часть теплоты, генерируемая трением направляется в отдельные элементы трибосоприжения [9]:

$$\alpha t = 1,5 \frac{\pi}{r} \frac{C}{\lambda} k \quad (18)$$

Отношение  $\frac{C}{\lambda}$  определяют теплофизические характеристики трибосистемы частицей геомодификатора ( $C$ ) и вязкой среды ( $\lambda$ ), которую можно так же обозначить  $L$ :

$$\alpha t = 1,5 \frac{\pi}{r} L k \quad (19)$$

## Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317  
ISI (Dubai, UAE) = 1.582  
GIF (Australia) = 0.564  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
РИИЦ (Russia) = 0.126  
ESJI (KZ) = 9.035  
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630  
PIF (India) = 1.940  
IBI (India) = 4.260  
OAJI (USA) = 0.350

С помощью записи коэффициента  $\lambda$  вида (19) можно переписать уравнение (12) в виде:

$$V2 = V1 \exp \left( -\frac{1,5}{r} \eta Lk \right) \quad (20)$$

### Анализ полученного уравнения и выводы из него вытекающие

Уравнение (20), указывает на два очевидных способа существенного увеличения времени выпадения осадка в системе смазочная среда – частицы ММТ. Это, во-первых, увеличение вязкости среды  $\eta$  и уменьшение пути размола линейных размеров частиц ММТ. Однако достаточно очевидно, что эти требования имеют и ограничения, например, крупность помола имеет свои оптимальные значения [1], а вязкость соответственно ограничивается условиями эксплуатации конкретного трибосопряжения

Известно, что коэффициент распределения тепловых потоков в первом приближении можно написать в явном виде [9;10]:

$$k = \frac{\sqrt{\rho_1 c_1 \lambda_1}}{\sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2}} \quad (21)$$

где  $\rho_1, c_1, \lambda_1, \rho_2, c_2, \lambda_2$  - соответственно плотности, теплоемкости и теплопроводности вязкой среды и ММТ

Тогда уравнение (19) может быть записано в виде:

$$at = 1,5 \frac{\eta}{r} \rho_{от}^{1/2} \sqrt{\frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}} \quad (22)$$

где  $\rho_{от} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$  - относительная плотность материала трибосопряжения

Тогда соотношение (20) можно записать в виде:

$$V2 = V1 \exp \left( -1,5 \frac{\eta}{r} \rho_{от}^{1/2} \sqrt{\frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}} \right) \quad (23)$$

Уравнение (23) конкретизирует дополнительные требования, предъявляемые к материалам рассматриваемого трибосопряжения. Для максимального уменьшения процесса выпадения осадка, помимо высокой вязкости материала смазки необходимым условием является близость его плотности к плотности частицы ММТ. При соблюдении этого условия также необходимо чтобы материалы трибосопряжения обладали высокой теплоемкостью при слабой теплопроводностью. Соотношение (23) может быть выражено через

параметр, называемый температуропроводностью  $\alpha = \lambda/c\rho$  [8]:

$$V2 = V1 \exp \left( -\frac{1,5}{r} \frac{\eta_1}{\rho_2} \frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \right) \quad (24)$$

Выражение (24) делает анализ формул (12,23) более простым ввиду меньшего количества задействованных в данном выражении параметров. В соответствии с (24) выпадение осадка происходит тем сильнее, чем больше масса частицы и больше температуропроводность компонентов трибосопряжения. Выпадения осадка замедляется при использовании более вязких средств, который вводится ММТ.

### Влияние снижения скорости выпадения осадка на антифрикционные характеристики трибосопряжения.

Как отмечалось ранее защитно-антифрикционный эффект от введения ММТ в смазочный материал определяется ударным воздействием отдельных частиц ММТ на поверхность трения приводящая к механоактивации поверхности фрикционного контакта, обеспечивающее образование сильных адгезионных связей между отдельными частицами ММТ и поверхностью трения [1-3]. Очевидно, что формирование поверхностной пленки в данном случае определяется значением кинетической энергии, на летающих на поверхности трения частиц ММТ. Однако, влияние вязкой среды сводится к уменьшению скорости на летающих частиц на величину  $\exp \left[ -\frac{3}{r} \eta_1 / \rho_2 \cdot (\sqrt{a_1 a_2}) \right]$ . Последний уменьшает механоактивирующие воздействия со стороны частиц ММТ на поверхность трения и соответственно снижению вероятности образования адгезионных связей между материалом ММТ и поверхностью фрикционного контакта. Следовательно, увеличение вязкости смазочного материала наряду со снижением процесса формирования осадка может сказаться на кинетике образования антифрикционных поверхностных плёнок, что существенно снижает эффективность применения геомодифицированных присадок. Следовательно, решение вопроса снижении выпадения осадка может ухудшить антифрикционные действия ММТ.

## References:

1. Dolgoplov, K.N., Poteha, V.L., & Lubimov, D.N. (2014). *Tribologija geomodificirovannyh*

*smazochnyh materialov*: monografija. (p. 429, pp.120-121). Grodno: GGAU.

<b>Impact Factor:</b>	<b>ISRA (India) = 6.317</b>	<b>SIS (USA) = 0.912</b>	<b>ICV (Poland) = 6.630</b>
	<b>ISI (Dubai, UAE) = 1.582</b>	<b>PIHII (Russia) = 0.126</b>	<b>PIF (India) = 1.940</b>
	<b>GIF (Australia) = 0.564</b>	<b>ESJI (KZ) = 9.035</b>	<b>IBI (India) = 4.260</b>
	<b>JIF = 1.500</b>	<b>SJIF (Morocco) = 7.184</b>	<b>OAJI (USA) = 0.350</b>

---

2. Dzhost, H.P. (1990). Proshloe i budushhee tribologii. *Trenie i iznos*, №1 (11), pp. 149-159.
3. Lubimov, D.N., & Dolgopolov, K.N. (2010). *Formirovanie smazochnyh sloev pod vozdejstviem na poverhnost` trenija mineral`nyh modifikacij trenija*. sb.nauch. trudov X Mezhdunarod. konf. «Tribologija i nadezhnost`» (pp.264-270). SPb: Peterburgskij un-t putej i soobshhenija.
4. Dolgopolov, K.N., Lubimov, D.N., Ponomarenko, A.G., Chigareno, G.G., & Bojko, M.V. (2009). Struktura smazochnyh sloev, formiruemyh pri trenii v prisutstvii prisadok mineral`nyh modifikatorov trenija. *Trenie i iznos*, (30) №5, pp. 516-521.
5. Lubimov, D.N., Dolgopolov, K.N., & Kozhemjachenko, A.V. (2008). Mehanizm formirovanija pokrytija v processe petrotribotehnicheskogo metoda obrabotki metallov treniem. *Vestnik Vostochnoukrainskogo nacional`nogo universiteta im. V.Dalja*, № 2 [120], pp.197-201.
6. Hajnike, G. (1987). *Tribohimija*. (p.635, 141). Moscow: Mir.
7. Kuhling, H. (1983). *Spravochnik po fizike*. (p.520, 227). Moscow: Mir.
8. Xajkin, S.Je. (1971). *Fizicheskie osnovy mehaniki*. (p.751, 451). Moscow: Nauka.
9. Shvedkov, E.L., Rovinskij, D.Ja., Zozulja, V.D., & Braun, Je.D. (1979). *Slovar`-spravochnik po treniu, iznosu i smazke detalej mashin*. (p. 188, 62). Kiev: Nauk. dumka.
10. Kolesnikov, V.I., Sychev, A.P., Dosov, D.G., & Cibulin, V.V. (2005). Raschet temperaturnogo polja antifrikcionnogo metalopolimernogo kol`cevogo diska. *Vestnik RGUPS*, №2, pp.9-18.