

В.В. Терентьев<sup>1</sup>, И.А. Телегин<sup>1</sup>, О.Б. Аكوпова<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Верхневолжский ГАУ»,  
Иваново, Россия, vladim-terent@yandex.ru  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ИвГУ», Иваново, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДОПИРОВАНИИ ИХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И МЕТАЛЛОМЕЗОГЕНОМ

### Аннотация

На основе анализа, используемых в настоящее время методов улучшения триботехнических характеристик смазочных материалов, нами показана перспективность применения в качестве трибоактивных присадок к ним термотропных металломезогенов, например, карбоксилатов меди. Это послужило отправной точкой в дальнейшем изучении некоторых пластичных смазок, и влиянии на их антифрикционные, противоизносные и антизадирные свойства совместного введения углеродных нанотрубок и карбоксилатов меди. Оказалось, что их совместное введение позволяет значительно улучшить триботехнические показатели смазок на углеводородной основе за счет их синергетического воздействия и формирования в зоне трения прочных устойчивых жидкокристаллических пленок.

*Ключевые слова:* металломезогены, смазка, трение, углеродные нанотрубки.

### Введение

Всегда вопросы повышения долговечности деталей машин являются приоритетными. Одним из эффективных путей повышения их долговечности является улучшение условий работы деталей машин посредством применения смазочных материалов (СМ) с улучшенными вязкостно-температурными и триботехническими характеристиками. Современный СМ, как правило, имеет в своем составе различные компоненты, влияющие на процессы трения и износа деталей трибосопряжений. Одним из наиболее простых и распространенных способов улучшения характеристик СМ является наполнение их различными трибоактивными присадками. Ранее проведенные исследования [1-6] доказывают эффективность и перспективность использования термотропных жидкокристаллических соединений (карбоксилатов металлов, фталоцианинов и др.) в качестве трибоактивных компонентов СМ для узлов трения различной техники. Также известны работы [7-10], в которых авторы показывают эффективность введения УНТ в некоторые масла. В одной из наших работ [11] представлены результаты исследований влияния на противоизносные характеристики пластичных смазочных материалов (ПСМ) совместного введения термотропного металломезогена ундецилата меди и УНТ. При этом в малонагруженных узлах трения было обнаружено снижение интенсивности изнашивания стальных поверхностей в 2,42-22 раза [11]. Однако в работе [11], также, как и в других [12-15] отсутствуют сведения по другим триботехническим показателям (антифрикционным, противозадирным) подобных смазочных композиций.

Целью настоящей работы является расширение области исследования по выявлению закономерностей влияния совместного воздействия присадок ундецилата меди (УМ) и углеродного материала ТАУНИТ-М не только на антифрикционные свойства, но и противозадирные, противоизносные характеристики ряда ПСМ при постепенном изменении (увеличении) нагрузки.

### **Материалы и методы**

В качестве УНТ применяли «ТАУНИТ-М» производства НаноТехЦентр, г. Тамбов. Ундецилат меди синтезирован в соответствии с условиями [12].

Для достижения поставленной цели готовились композиции из пластичной смазки (ПС) с присадкой УНТ типа ТАУНИТ-М, которая для лучшего диспергирования вводилась с помощью ультразвуковой ванны SONOREX SUPER при частоте ультразвуковых колебаний 35 кГц в синтетический солидол марки С ГОСТа 4366 (в дальнейшем солидол С) или в Литол-24 по ТУ-0254-11604001396-05. Далее в полученную композицию в виде порошка был добавлен ундецилат меди. Затем композиция при перемешивании нагревалась до 70–80<sup>0</sup>С с продолжающимся нагревом еще в течение 20 мин для достижения однородности смеси.

Антифрикционные показатели были определены на машине трения 2070СМТ-1 по изменению коэффициента трения. Условия испытаний: схема трения «подвижный ролик-неподвижный вкладыш». Материал ролика – сталь 40Х ГОСТ 4546-2016. Материал вкладыша – сталь 45 ГОСТ 1050-2013. Нагрузка на образцы изменялась ступенчато, до резкого возрастания коэффициента трения, который характеризует схватывание поверхностей. Также в процессе исследований контролировалось изменение температуры смазочного материала на выходе из зоны трения.

Термомикроскопические исследования проведены на поляризационном микроскопе МИН-8 с термонасадкой оригинальной конструкции.

### **Результаты и обсуждение**

На рисунке 1 представлены зависимости коэффициента трения от нагрузки на исследуемые образцы и концентрации присадки при совместном введении УМ и углеродного материала ТАУНИТ-М в солидол С, что позволяет значительно снижать коэффициент трения, в среднем 1,5-5,1 раза (по сравнению с солидолом без присадок).

Сравнивая приведенные результаты с ранее полученными данными [13], следует отметить, что введение металломезогена УМ в синтетический солидол, наполненный углеродными нанотрубками, вносит дополнительный эффект на дальнейшее снижение коэффициента трения (в зависимости от нагрузки дополнительное снижение составило в 1,3-4,5 раза). При этом максимальный эффект проявляется в условиях повышенных нагрузок на образцы.

Снижение значений коэффициента трения способствует значительному уменьшению температуры в зоне трения, что видно из результатов определения прироста температуры за время испытаний, приведенных на рисунке 2. Из этих зависимостей следует, что значительное снижение температуры наблюдается при совместном введении в солидол УНТ с ундецилатом меди (прирост температуры в зависимости от действующих нагрузок на образцы по сравнению с ненаполненным солидолом снижается в пределах от 1,7 до 3,8 раз). Таким образом, дополнительное введение ундецилата меди в смазочную композицию, содержащую УНТ, позволяет

снижать температуру смазочного материала, повышая его эксплуатационные характеристики.

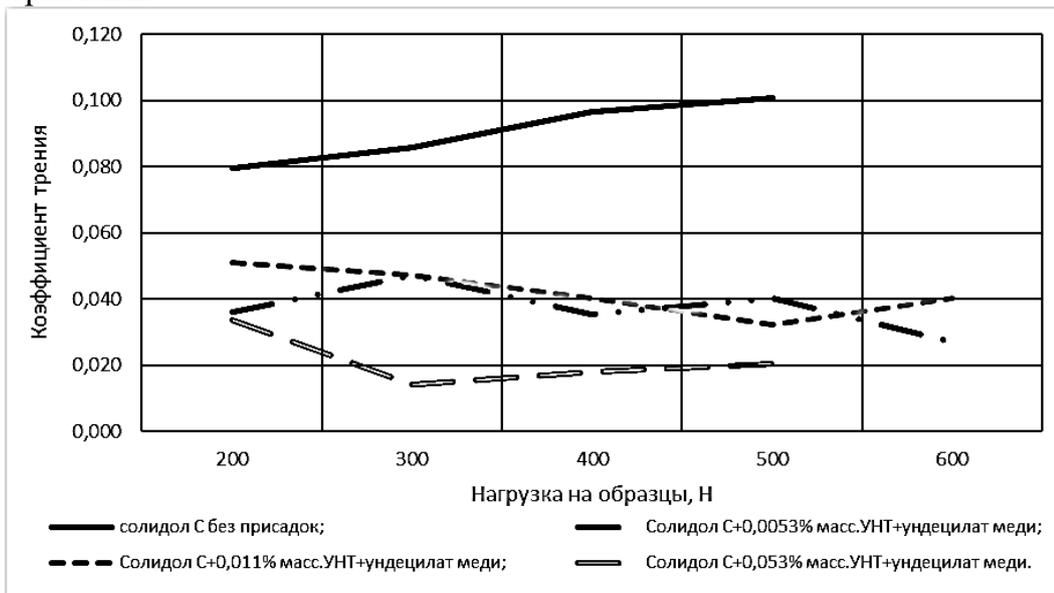


Рисунок 1 – Результаты определения коэффициента трения для смазочных композиций на основе солидола

В свою очередь, улучшение антифрикционных характеристик и прочностных свойств смазочного слоя способствует повышению нагрузки, при которой происходит схватывание и задир образцов. Нами установлено, что при совместном введении УНТ и УМ в солидол по сравнению с ним без присадок, нагрузка, при которой происходит задир образцов, повышается в среднем в 1,2 раза.

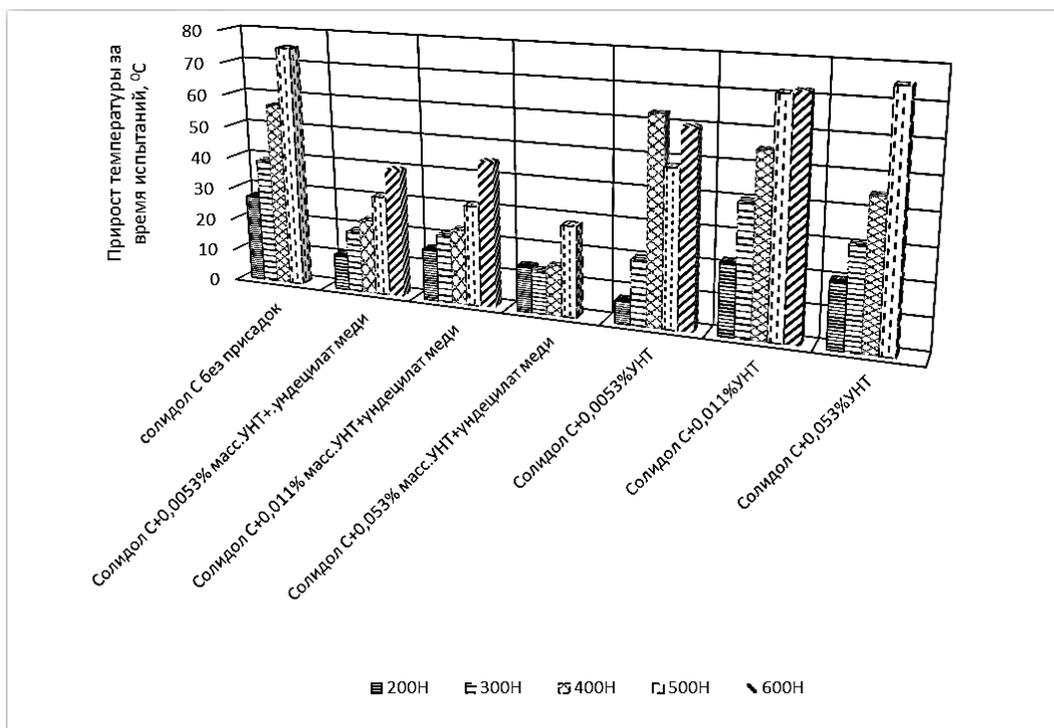


Рисунок 2 – Результаты определения прироста температуры за время испытаний для смазочных композиций на основе солидола С

Полученные результаты по снижению коэффициента трения и прироста температуры в зоне трения обусловлены совместным воздействием УМ и углеродного материала ТАУНИТ-М. Механизм такого воздействия мы связываем с

улучшением прочностных характеристик смазочных пленок за счет встраивания УНТ в упорядоченные колончатые структуры УМ и создания в приповерхностном слое совместно с основной смазки (солидолом) упорядоченной жидкокристаллической пленки. Подтверждению предполагаемого механизма косвенно служат исследования, которые выполнены нами по влиянию введения указанных присадок на проявление ЖК-свойств у смесей солидола с присадками (УМ, УНТ) и без них в сравнении со смесями литола-24 с такими же присадками. Термомикроскопические наблюдения были проведены для исходных ПС, вводимых присадок и их смесей с ПС. Результаты исследований представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Данные о мезоморфизме смазочных композиций и их составных частей

Соединение или смазка	$T_{пл} - T_{пр},$ °C	$T_{пл. или}$ деструкц., °C	Наличие мезофазы	Наличие и тип текстуры	Наличие и тип коноскопической фигуры
УМ	83 – 256	256	М	Негеометрическая (табл. 2, а)	Не наблюдается
C <sup>1</sup>	-30 – 65	90	?	Характерной текстуры не наблюдается	Не наблюдается
СУМ <sup>2</sup>	40 – 110	155	М	Сферолиты мезофазы (табл. 2, b)	Фигура одноосного ЖК (табл. 2, c)
С-УНТ (~0.05%)	–	110	НМ	Текстура дисперсии анизотропных частиц (табл. 2, d)	Не наблюдается
С-УНТ (~0.01%)	–	100	М	Сферолиты мезофазы (табл. 2, e)	Не наблюдается
С-УНТ (~0.005%)	–	115	НМ	Текстура дисперсии анизотропных частиц (табл. 2, f)	Не наблюдается
СУМ-УНТ (~0.05%)	< 25 – 90;	>120;	М	Сферолиты мезофазы (табл.2, g)	Фигура одноосного ЖК (табл.2, h).
СУМ-УНТ (~0.01%)	22 – 70;	≥100;	М	Сферолиты мезофазы (табл.2, i)	Выражена неявно (табл.2, j). Фигура
СУМ- УНТ (~0.005%)	25 – 80	>120	М	Сферолиты мезофазы (табл. 2, k)	одноосного ЖК (табл.2, l)

Примечание: <sup>1</sup>- Солидол С; <sup>2</sup>- С-УМ (< 10 %);  $T_{пр}$  – температура просветления мезофазы; М – мезофаза; НМ – смесь немезоморфна

Из выполненных исследований по изучению мезоморфного поведения смесей и их компонентов (таблицы 1, 2) было обнаружено, что основа смесей-солидол, который включает кальциевые мыла, обладает слабо выраженной анизотропией и не проявляет характерных для ЖК-текстур. Металломезогенная присадка УМ характеризуется в цикле нагрева негеометрической текстурой (таблица 2, а) и плавится с разложением при температуре 256 °C (таблица1), сохраняя такую же текстуру и при охлаждении. Введение в солидол ундецилата меди в небольших количествах (<10%) способствует формированию термотропной мезофазы в диапазоне от 40 °C до 100 °C (таблица 1, таблица 2, c) и положительно влияет на триботехнические характеристики смеси (таблица 3).

Таблица 2 - Текстуры и коноскопические фигуры ПС и их составных частей

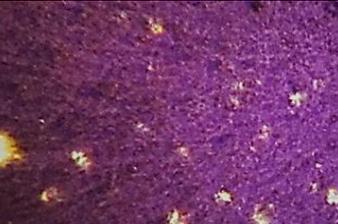
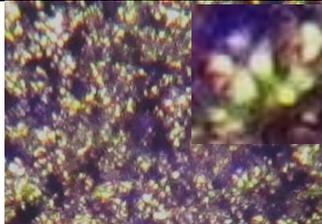
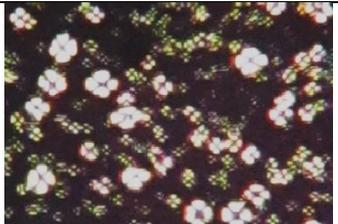
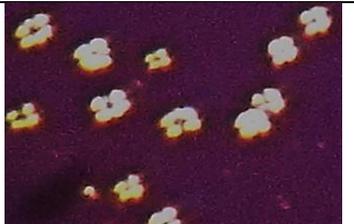
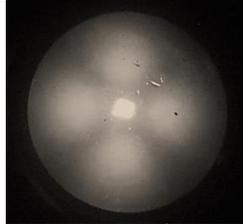
 <p>a) Негеометрическая текстура УМ в цикле нагрева, <math>T = 140^{\circ}\text{C}</math>, николи X, увеличение 250.</p>	 <p>b) Сферолиты мезофазы смеси СУМ в цикле охлаждения, <math>T = 60^{\circ}\text{C}</math>, николи X, увеличение <math>\times 180</math></p>	 <p>с) Коноскопическая фигура одноосной мезофазы в сходящемся свете смеси СУМ, <math>T = 25^{\circ}\text{C}</math>, николи X.</p>
 <p>d) Дисперсия анизотропных частиц неправильной формы в смеси С-УНТ (~0.05%), <math>T = 75^{\circ}\text{C}</math>, цикл охлаждения, николи X, увеличение <math>\times 250</math>.</p>	 <p>e) Неявно выраженные сферолиты мезофазы смеси С-УНТ (~0.01%), <math>T = 75^{\circ}\text{C}</math>, цикл охлаждения, николи X, увеличение <math>\times 250</math>. Вставка: увеличение <math>\times 400</math></p>	 <p>f) Картина неравномерного распределения анизотропных частиц в смеси С-УНТ (~0.01%), <math>T = 70^{\circ}\text{C}</math>, цикл охлаждения, николи X, увеличение <math>\times 180</math></p>
 <p>g) Текстура мезофазы (домены в виде 4-х лепестковых сферолитов-цветочная текстура) смеси СУМ-УНТ (~0.05%), цикл повторного нагрева, <math>T = 90^{\circ}\text{C}</math>, николи X, увеличение <math>\times 250</math>.</p>	 <p>h) Коноскопическая фигура одноосной мезофазы в сходящемся свете смеси СУМ-УНТ (~0.05%), цикл охлаждения 2, <math>T = 60^{\circ}\text{C}</math>, увеличение <math>\times 180</math>.</p>	 <p>i) Текстура участка мезофазы смеси СУМ-УНТ (~0.01%) до нагрева, <math>T = 22^{\circ}\text{C}</math>, николи X, увеличение <math>\times 250</math></p>
 <p>j. Коноскопическая фигура в сходящемся свете смеси СУМ-УНТ (~0.01%), до нагрева, <math>T = 22^{\circ}\text{C}</math>, увеличение <math>\times 250</math>. Видна дискретность фигуры, т.е. неоднородность образца</p>	 <p>к. Текстура смеси СУМ-УНТ (~0.005%), цикл охлаждения, <math>T = 50^{\circ}\text{C}</math>, николи X, увеличение <math>\times 180</math>. Видны мелкие сферолиты мезофазы</p>	 <p>l. Коноскопическая фигура одноосной мезофазы в сходящемся свете смеси СУМ-УНТ (~0.005%), цикл охлаждения, <math>T = 35^{\circ}\text{C}</math>, увеличение <math>\times 180</math>.</p>

Таблица 3 - Экспериментальные данные по определению коэффициента трения для исследованных смазочных материалов (нагрузка на образцы 200Н)

Солидол С	Солидол+ УНТ	Солидол + ундецилат меди	Солидол+ УНТ+ ундецилат меди	Литол 24	Литол-24+ УНТ	Литол-24+ ундецилат меди	Литол-24+ УНТ+ ундецилат меди
0,08	0,078	0,05	0,034	0,064	0,056	0,054	0,051

Введение в солидол УНТ (Таунит М) так же приводит к улучшению триботехнических показателей смесей, хотя и в меньшей степени, чем при использовании ундецилата меди (таблица 3). Мезоморфизм у смесей С-УНТ был обнаружен только при введении ~0.01 масс. % УНТ (таблица 1, таблица 2, е) и в очень узком интервале температур вблизи перехода в изотропную жидкость.

При совместном введении в солидол УМ и УНТ и разных концентрациях добавок УНТ было обнаружено наличие мезоморфизма у всех трех смесей (таблица 1, смеси СУМ-УНТ: ~0.05%, ~0.01%, ~0.005%; таблица 2, g, i, k). Обнаружение коноскопических фигур одноосной мезофазы (таблица 2, h, j, l) исследуемых смесей свидетельствует о достаточно хорошей ориентационной упорядоченности ПС в диапазоне рабочих температур смеси, что способствует существенному улучшению их триботехнических характеристик по сравнению, с ранее изученными нами смазками (рисунок 3, таблица 3).

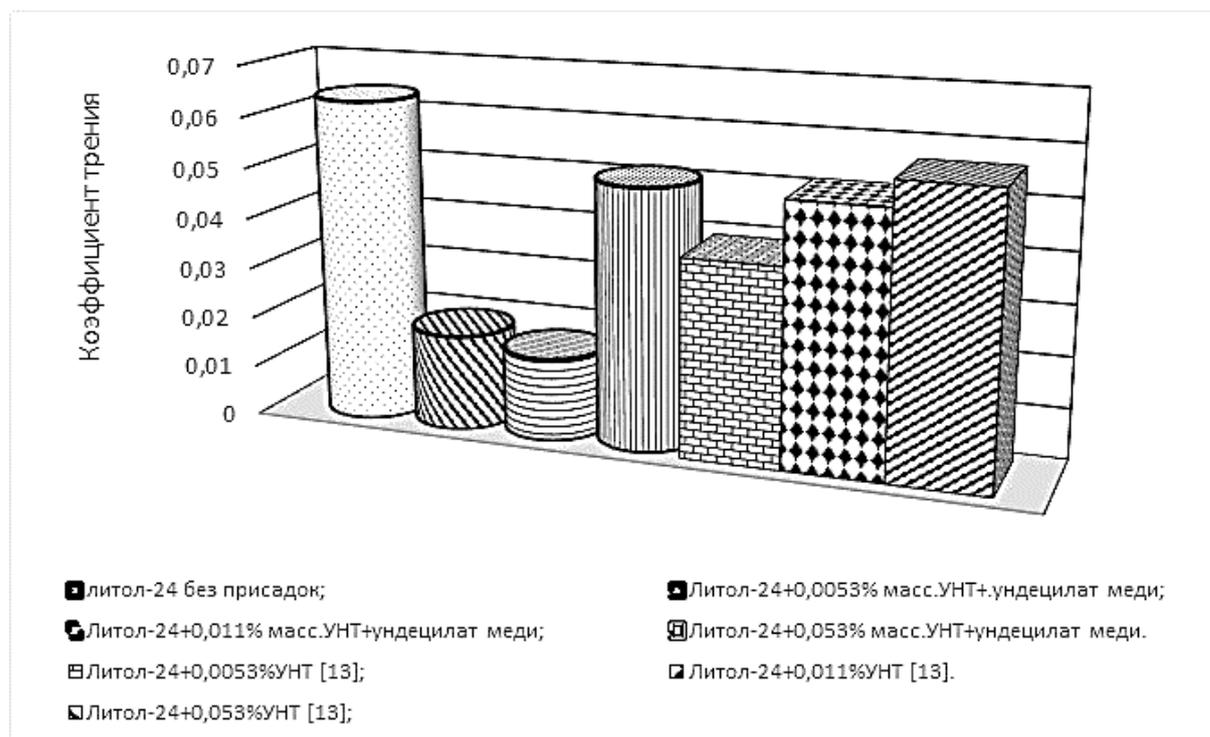


Рисунок 3 – Результаты определения коэффициента трения для смазочных композиций на основе литол-24 при нагрузке на образцы 200Н

Как показали наши исследования, смеси на основе Литола-24 менее склонны к формированию устойчивых мезофаз. Не было обнаружено и каких-либо коноскопических фигур у смесей. При совместном введении УМ и УНТ в литол-24 антифрикционные характеристики последнего тоже улучшаются (таблица 3, рисунок 3), но в меньшей степени, чем при использовании смесей СУМ-УНТ.

Как следует из рисунка 3, при совместном введении УНТ и УМ в литол-24

коэффициент трения снижается в 1,25-4 раза по сравнению с литол-24 без присадок.

Сравнение с данными [13] показывает, что дополнительное введение УМ в ПС с УНТ (от ~0,053 до ~0,005 масс.%), также как и в случае смазок на основе солидола, положительно влияет на антифрикционные характеристики, снижая коэффициент трения, в 2-3 раза.

Улучшение антифрикционных характеристик способствует повышению противоизносных показателей, что, в свою очередь, приводит к повышению долговечности элементов пары трения. И это подтверждается результатами исследований, представленными в работе [11].

Однако, как показали проведенные экспериментальные исследования, для смазочных композиций на основе литол-24 противозадирные характеристики смазочного материала повышаются незначительно.

### **Заключение**

По результатам проведенных исследований установлено положительное влияние совместного допирования углеродными нанотрубками и ундецилатом меди на антифрикционные и противозадирные характеристики пластичных смазочных материалов за счет их синергетического воздействия и формирования в зоне трения устойчивых жидкокристаллических пленок. Более ярко эффект улучшения выражен для смазочных материалов на основе синтетического солидола.

### **Благодарности**

Работа поддержана грантом № FZZM-2023-0009 Минобрнауки РФ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Берёзина, Е.В. Кривые течения пластичных смазочных материалов с жидкокристаллическими присадками / Е.В. Березина, М.Н. Корсаков, А.С. Павлов, В.В. Быкова, Н.В. Усольцева // Жидкие кристаллы и их практическое использование.- 2010.- Вып. 2 (32).- С. 85-96.
2. Ермаков, С.Ф. Влияние холестерических жидких кристаллов на трибологические свойства динамически контактирующих поверхностей / С.Ф. Ермаков, Н.К. Мышкин, А.Л. Богданов // Физика, химия и механика трибосистем.- 2015.- № 12.- С. 107-115.
3. Колбашов, М.А. Триботехнические свойства машинных масел с присадками жидких кристаллов/ М.А. Колбашов, С.А. Сырбу, В.В. Новиков // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции. - Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России.- 2017.- С.312-316.
4. Ермаков, С.Ф. Эффект повышения адсорбционной активности холестерических жидкокристаллических соединений в процессе трения твердых тел / С.Ф. Ермаков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. - 2018. - Т. 62, № 2. - С. 236-243.
5. Павлов, А.С. Применение производных холестерина в качестве присадок пластичных смазочных материалов/ А.С. Павлов, Е.В. Березина, В.А. Годлевский // Вестник машиностроения.- 2011.- № 6.- С. 44-47.
6. Березина, Е.В. Эффективность присадок холестерической природы в составе некоторых пластичных смазочных материалов / Е.В. Березина, В.А. Годлевский, А.С. Павлов, М.Н. Корсаков, Д.С. Фомичев // Трение и смазка в машинах и механизмах.- 2012.- № 11.- С. 21-26.

7. Попова, М.Н. Реологические и триботехнические свойства индустриального масла с мезогенными присадками и углеродными нанотрубками / М.Н. Попова, М.А. Жарова, Н.В. Усольцева, А.И. Смирнова, В.С. Богданов // Жидкие кристаллы и их практическое использование.-2014.- Т.14.- № 1.- С. 52-61.
8. Шилов, М.А. Моделирование деформационных процессов углеродных нанотрубок/ М.А. Шилов, А.И. Смирнова, Д.Н. Столбов, Н.В. Усольцева // Жидкие кристаллы и их практическое использование.- 2020.- 20 (1).- С.85-91.
9. Parfenov, A.S. Influence of various carbon allotropes on tribological and rheological characteristics of model lubricating systems/ A.S. Parfenov, E.V. Berezina, M.A. Shilov, A.I. Smirnova, N.V. Usol'tseva, A.G. Tkachev, A.A. Burkov, N.N. Rozhkova // Journal of Friction and Wear.- 2021.- Т.42.- № 3.- С. 217-224.
10. Селькин, В.П. Повышение противоизносных свойств индустриального масла путем введения одностенных углеродных нанотрубок / В.П. Селькин, Ф.А.Григорьев, С.В. Копылов // В сборнике: Наука, техника, педагогика в высшей школе. Материалы Всероссийской научно-практической конференции.- М.: 2023.- С. 227-231.
11. Терентьев, В.В. Исследование противоизносных свойств пластичных смазочных материалов с введенными углеродными нанотрубками и металломезогеном – ундецилатом меди / В.В. Терентьев, И.А. Телегин, О.Б. Аكوпова // Научно-исследовательская деятельность в классическом университете – 2023: традиции и инновации : материалы Международного научно-практического фестиваля.- Иваново: Иван. гос. ун-т.- 2023.- С.227-233.
12. Аكوпова О.Б. Карбоксилаты меди. Моделирование, синтез, мезоморфизм и триботехнические свойства / О.Б. Аكوпова, В.Б. Лапшин, В.В. Терентьев, В.С. Богданов // Жидкие кристаллы и их практическое использование.- 2012.- Вып. 2.- С. 20-28.
13. Терентьев В.В. Модификация пластичных смазочных материалов введением углеродного материала «ТАУНИТ-М» / В.В. Терентьев, В.Б. Лапшин, М.В. Якемсева, Н.В. Усольцева, О.Б. Аكوпова // Жидкие кристаллы и их практическое использование.- 2013. -№2(44).- С.73-79.
14. Dierking, I. Aligning and Reorienting Carbon Nanotubes with Nematic Liquid Crystals./ I. Dierking, G. Scalia, P. Le Clere D. Morales // Adv. Mat. 2004.- V. 16.- No 11.- P. 865–869.
15. Dolgov O., / Liquid Crystal Dispersions of Carbon Nanotubes: Dielectric, Electro-Optical and Structural Peculiarities / O. Dolgov, O. Kovalchuk, N. Lebovka, S. Tomylko, O. Yaroshchuk // In book: Carbon Nanotubes.- 2010. Ed. J. M. Marulanda. - 782 p. (P. 451-484).

V.V. Terentyev<sup>1</sup>, I.A. Telegin<sup>1</sup>, O.B. Akopova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSBEIHE «Verkhnevolzhsk SUAB»

Ivanovo, Russia, vladim-terent@yandex.ru

<sup>2</sup> FSBEIHE «IvSU», Ivanovo, Russia

**INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PLASTIC LUBRICANTS DURING THEIR JOINT DOPING WITH CARBON NANOTUBES AND METALLOMESOGEN**

## Abstract

Based on the analysis of currently used methods for improving the tribotechnical characteristics of lubricants, we have shown the prospects of using thermotropic metallomesogens, for example, copper carboxylates, as triboactive additives to them. This served as a starting point in the further study of some greases, and the effect on their antifriction, anti-wear and extreme pressure properties of the joint introduction of carbon nanotubes and copper carboxylates. It turned out that their joint introduction makes it possible to significantly improve the tribotechnical performance of hydrocarbon-based lubricants due to their synergistic effect and the formation of strong stable liquid crystal films in the friction zone.

*Keywords:* metallomesogens, lubrication, friction, carbon nanotubes.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-267

Р.В. Корнеев, М.А. Скотникова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия. krvthecreator@gmail.com

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА НА ГАЗОПРОВОДЕ

### Аннотация

В работе рассмотрены основные методы автоматизации мониторинга износа на поверхностях трубопровода и рулевой тяги оборудования. Предложен простой в применении алгоритм автоматического обнаружения повреждений магистрального трубопровода на основе вибрации и данных. Этот подход позволил обнаруживать повреждения с помощью одного акселерометра на контролируемой тяге, не требует знания физических переменных, например, осевой нагрузки на рулевую тягу, временных проверок и может выполняться без присмотра человека-оператора.

Применение процедуры очистки данных, алгоритм обнаружения повреждений, основанный на методе MSD (квадрат расстояния Махаланобиса), построения логистических кривых (регрессии) ROC, позволили полностью автоматически осуществить мониторинг рулевой тяги с помощью одного датчика и простого алгоритма, который не требует знания физических переменных, например, осевой нагрузки на рулевую тягу.

Показано, что с увеличением повреждений и увеличения коэффициента модального затухания от  $\xi=5/8L$  до  $\xi=8/10L$ , графики ROC-кривой проходят через верхний левый угол, где доля истинно положительных результатов составляет 100%, а предсказательная способность модели возрастает, особенно, когда результаты представлены со скользящим средним.

*Ключевые слова:* автоматизация, мониторинг износа, газопровод.

### Введение

Магистральным газопроводом называется трубопровод, предназначенный для транспортировки газа из района добычи в районы его потребления. Движение газа по магистральному газопроводу обеспечивается компрессорными станциями, сооружаемыми по трассе через определенные расстояния (рис.1).