

УДК 621.891:539.2

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Поляков С.А.<sup>1,2</sup>, Куксенова Л.И.<sup>2</sup>, Черторыльский И.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук  
(ИМАШ РАН, г. Москва, Россия)

[www.imash.ru](http://www.imash.ru)

Рассмотрены методические основы формирования смазочной пленки в опорах скольжения при использовании нанодисперсных добавок к смазочному материалу, которые позволяют расширить область допустимых эксплуатационных воздействий на эти узлы, повысив их триботехническую работоспособность. Даны примеры повышения параметров технического состояния для конкретных видов опор скольжения.

**Введение.** Известно, что для расширения области реализации безопасного (как правило, жидкостного) режима смазывания сопряжений скольжения необходимо увеличивать толщину смазочной пленки [1,2]. Традиционные пути ее увеличения – подбор вязкостных свойств смазочного материала и конструкции узла трения – сегодня, в основном, исчерпали себя. Поэтому актуальной задачей является выбор новых способов повышения несущей способности сопряжений скольжения.

Известно, например, что повышение общей толщины смазочной пленки и эффективное формирование ее минимально допустимой величины ( $h_{\min}$ ) возможно с помощью пленкообразующих смазочных материалов [3,4]. При этом процесс пленкообразования может сопровождаться формированием у сопряжения скольжения нового свойства – склонности к адаптации [4]. Использование этого свойства в узлах трения может стать новым источником повышения их работоспособности.

Известно, что формирование защитных пленок на поверхностях трения в результате действия смазочного материала давно используется в повышении задиростойкости, износостойкости и в целом триботехнической работоспособности сопряжений скольжения [2,5,6], однако такое свойство как адаптивность проявляется далеко не всегда.

В последние десятилетия получили распространение некоторые минеральные добавки, получившие определенный отклик в ряде публикаций [7]. Например, некоторые минералы слоистого типа (графит,  $\text{MoS}_2$  и др.) в высокодисперсном состоянии используются в качестве противоизносных присадок к смазочным материалам [7,8]. Положительный эффект использования этих минералов обусловлен их способностью образовывать на поверхностях трения тонкие пленки, состоящие из чешуйчатых частиц, ориентированных параллельно поверхности трения и улучшающих их триботехнические свойства. Однако присадки на основе графита и  $\text{MoS}_2$  обладают рядом недостатков, отмеченных в [9], в частности, химической нестабильностью в определенных условиях, поэтому вопрос о замене такой присадки является актуальным [9,10].

Известны попытки использования в качестве антифрикционного наполнителя для некоторых смазочных материалов слоистых силикатов, включая наиболее поздние узкоспециализированные исследования [11,12]. Важным выводом, сделанным в этих исследованиях, является то, что получаемая пленка, несмотря на присущие ей защитные функции, недостаточно адаптивна [12]. Кроме того, существует проблема использования

таких составляющих слоистых силикатов, как асбестоподобные волокна, которые считаются экологически небезопасными.

В связи с указанными проблемами повышается актуальность решения задачи подбора сочетаний компонентов смазочной композиции, совместное действие (синергизм) которых будет приводить не только к процессу пленкообразования, но и к формированию адаптивных свойств у вновь образующейся на поверхностях трения антифрикционной пленки. Поэтому целью данной работы является анализ и оценка процесса пленкообразования при использовании пленкообразующих смазочных материалов на основе нанодисперсных неорганических составляющих и их влияние на адаптационные свойства сопряжений скольжения, позволяющие повысить их триботехническую работоспособность.

**Методические основы исследования.** Проблемы адаптивного пленкообразования связаны, в первую очередь, с качеством вводимой пленкообразующей добавки. Важно, чтобы ядра мицелл коллоидного раствора обладали наноразмерными масштабами, а сам раствор был достаточно устойчив, как предлагается сделать, например, в [13]. В частности, в посвященной этой проблеме работе [14], эта задача не была до конца решена – уровень дисперсности оставался в диапазоне нескольких сотен нанометров. Однако для эффективного решения поставленной задачи важна не только дисперсность, но и характер процесса пленкообразования, в первую очередь, формирования пленкообразующих наноструктур, как это рассмотрено в [15, 16].

Проблема описания процессов формирования наноструктур и наноструктурных материалов является трудноразрешимой в силу существенной нелинейности подобных процессов. Нелинейность присутствует, в первую очередь, в описании процесса формирования единичного кластера как процесса конкуренции поверхностных и объемных сил, дающего в результате критический радиус кластера [17]. В то же время, важными факторами формирования наноструктуры являются термодинамические условия, которые, как правило, существенно неравновесны, что обуславливает сложное поведение и иерархическое строение получаемых структур.

Предположения о самоорганизации наноструктур считаются как бы очевидными, поэтому, зачастую, реальные нелинейные модели и математические методы описания процессов самоорганизации наноструктур, как это сделано, например, в работе [18] практически отсутствуют. Это связано с тем, что понятие самоорганизации вводится в [18] на интуитивном уровне без использования тех атрибутов, которые предложил автор концепции самоорганизации [19]. В то же время, для анализа синергетических эффектов за последние десятилетия разработан достаточно эффективный аппарат, позволяющий моделировать многие критические явления [20].

Разработка моделей нелинейных явлений в процессах формирования наноструктур представляет собой достаточно сложную задачу. Известные исследования в этой области [21,22] далеко не всегда дают ответы на вопросы о конкретных механизмах формирования структур и возможностях получения материалов с желательной для исследователя эволюцией структуры, в первую очередь, структуры, способной функционировать с асимптотической устойчивостью.

В частности, предлагаемое авторами [22] моделирование процессов формирования структуры с помощью традиционных методов химической кинетики, например, используемых этими авторами уравнений Авраамии, не дает возможности выявить собственно синергетические эффекты, в первую очередь, устойчивость получаемых структур. Основная проблема с точки зрения моделирования при использовании моделей типа традиционной химической кинетики, как это предлагается авторами [22], состоит в том, что подобные модели не содержат механизмов, приводящих к критическим явлениям, например, бифуркациям, без чего самоорганизация просто невозможна.

В то же время, развитие методов моделирования, в первую очередь, моделирования критических явлений в химической кинетике [23] в сочетании с экспериментальными

исследованиями позволяет достичь указанных возможностей.

По мнению авторов, ключевую роль в этих механизмах должна играть диффузия [19,20,23]. Именно диффузия является тем дополнительным механизмом диссипации, который провоцирует нелинейное поведение системы, например, в условиях химических взаимодействий и приводит к формированию диссипативной структуры. С другой стороны, диффузионные задачи типа распределения атомов по поверхности при дополнении их другими механизмами диссипации типа химических и адсорбционных взаимодействий могут дать объяснения неравномерности распределения атомов по поверхности, в частности, образования «островов» [21] в том случае, если дополнительный механизм диссипации (например, химическое взаимодействие) будет приводить к бифуркации диффузионных уравнений.

Хорошо известно, что одной из основных моделей, послужившей прототипом для описания процессов самоорганизации, была модель типа «реакция – диффузия» [20].

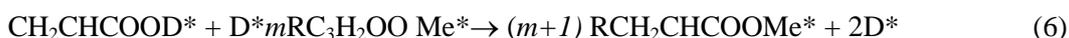
Формирование наноструктур на ранних этапах, как правило, аналогично процессу зародышеобразования новой фазы [17]. В принципе понятно, что этот процесс должен состоять из двух этапов - транспортировки молекул в область взаимодействия ("диффузия") и их непосредственного соединения в нанобъекты (кластеры, фуллерены, трубки, пленки и т.д.), что соответствует этапу «реакция». Простейший вариант такого процесса может быть описан с помощью схемы, получившей название в литературе «механизм Ленгмюра – Хиншельвуда» или «параллельный каталитический триггер» [23].

Рассмотрим его на примере формирования структур, содержащих углеводородные цепи и неорганические наночастицы, что в комплексе может быть использовано для формирования и упрочнения макроскопических структур типа пленок, покрытий и т.д.

Воспользуемся представлениями о формировании наноструктур и их дальнейшей самоорганизации, изложенными в [21,22], где в качестве катализатора выступает нанореактор, оказывающий влияние как на скорость протекания процесса, так и на форму возникающих наноструктур. В общем виде наиболее простая модель подобного процесса в одном из вариантов его реализации может быть описана следующим образом



где  $Z$  – катализатор (нанореактор, наночастица), стимулирующий процесс формирования структуры (обозначим его  $D^*$ );  $X$  – продукт окисления исходной смеси  $A = (nRC_2H_5 + nO_2 + nH_2O)$  до сочетания (олефин + альдегид)  $RC_2H_3 + RC_3H_2OH$ , где  $R$  – радикал,  $C$  – углерод,  $O$  – кислород,  $H$  – водород, а затем до жирной кислоты  $CH_2CHCOOD^*$  – первый интермедиат ( $X$ ),  $Y$  – соль жирной кислоты на катализаторе  $D^*mRC_3H_2OOME^*$  – второй интермедиат, включающий атомы металла, на поверхности которого протекает процесс. Итак, в реакции участвуют исходные продукты – углеводороды, кислород, вода, атомы наночастиц, которые служат сырьем для реакции, а также продукты реакции – соли жирных кислот с наночастицами и продукты полимеризации, в совокупности составляющие нанокompозит. С учетом изложенной конкретизации систему реакций (1,2,3) можно записать в виде



Анализ подобной системы проведен в работе [23]. Переход от стехиометрических соотношений (1)–(3) к системе дифференциальных уравнений осуществляется на основе закона действия масс с использованием кинетического полинома [23]. Для упрощения рассмотрим одно из трех дифференциальных уравнений, описывающих систему (4),(5),(6), например, отнесенное к концентрации компонента  $Y$  –  $y$ , что для введенных обозначений будет

представлять собой  $D^*mRC_3H_2OO Me^*$ , то есть соль жирной кислоты, образованной на наночастице металла и адсорбированной на поверхности катализатора – нанореактора. Для выявления искомого эффекта уравнение преобразуется к форме, содержащей пространственную координату, обозначенную  $\varepsilon$ . Тогда уравнение для этого интермедиата будет иметь следующий вид [23]

$$D_Y (\partial^2 y / \partial \varepsilon^2) + \kappa_2 z - \kappa_2 y - \kappa_3 xy = 0; \quad (7)$$

где  $D_Y$  - коэффициент диффузии компонента «у» по поверхности катализатора (нанореактора) или металла,  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  - константы скоростей соответствующих реакций, причем знак индекса указывает на прямую или обратную реакцию,  $\varepsilon$  - пространственная координата,  $z$  и  $x$  соответствуют концентрациям соответствующих компонент, обозначенных выше такими же, но заглавными буквами.

Как показывает анализ предложенной схемы, в ней уже возможно описание нелинейной эволюции структуры [23]. Вводя некоторые ограничения и дополнительные обозначения, а именно,  $-x(y) = \alpha - \beta(y)$ , где  $\alpha = D_Y y + D_X x$ , а  $\beta = (D_Y / D_X)$  и  $z(y) = (-\kappa_2 + \sqrt{\kappa_2^2 + 8\kappa_1 a}) / 4\kappa_1$ , где  $a = 2\kappa_1 + \kappa_2 y + 2\kappa_3 x(y)y$ ,  $D_X$  - коэффициент диффузии компонента X. Тогда можно преобразовать уравнение (7) к виду

$$D_Y (\partial^2 y / \partial \varepsilon^2) + \kappa_2 z - (\kappa_2 y + \kappa_3 x(y))y = 0; \quad (8)$$

В работе [23], в частности, показано, что данное уравнение имеет периодические решения по параметру  $\varepsilon$ , то есть интермедиаты и продукты реакции могут образовывать периодические пространственные структуры. Это обусловлено тем, что в данной системе возможно существование решений с множественными стационарными состояниями. Если обозначить

$$\partial y / \partial \varepsilon = A - U(y),$$

где  $A$  – постоянная интегрирования, то существуют решения, в которых функция  $U(y)$  имеет вид, представленный на рис.1.

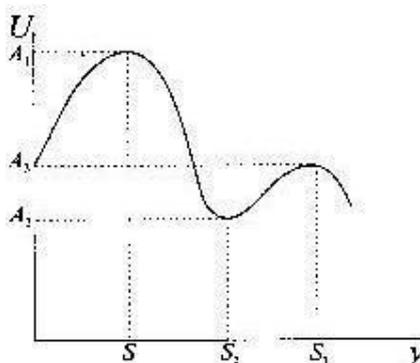


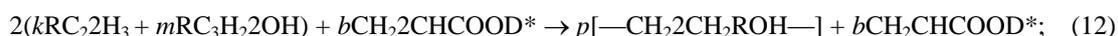
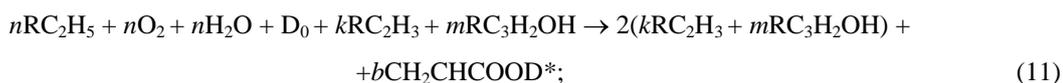
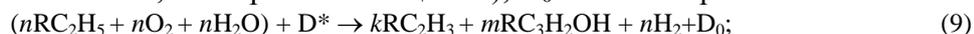
Рис. 1. График функции  $U(y)$

На графике присутствуют три экстремума, соответствующих стационарным состояниям, два из которых устойчивы. Это подтверждает, что согласно анализу, проделанному в [23], уравнение (8) имеет периодические решения по пространственной координате  $\varepsilon$ . Таким образом, интермедиаты системы (4,5,6) могут образовывать периодические пространственные структуры. Размеры этих структур будут зависеть от коэффициентов диффузии, которые, в свою очередь, будут определяться условиями протекания реакции, в частности, тепловыми потоками, то есть, пространственные параметры можно менять, воздействуя на условия протекания процесса. Это свойство самоорганизующихся систем может быть использовано для формирования технологически целесообразных структур, которые можно было бы назвать диссипативными наноструктурами.

Многочисленные примеры подобных структур приводятся, в частности, в работе [21]. Использование подобного подхода для получения асимптотически устойчивых структур приводится в работе [24].

В качестве конкретного применения изложенной концепции рассмотрим процесс формирования и функционирования композиционной пленочной структуры, возникающей при трении между двумя металлическими поверхностями в среде жидкого смазочного материала, содержащего пленкообразующие и каталитические наноструктурные компоненты. В качестве наноструктурных компонентов были использованы высокодисперсные неорганические частицы со средним размером порядка 100 нанометров, полученные в результате глубокой механохимической переработки исходного сырья (например, порошка полититаната калия) с помощью активных сред и длительного воздействия ультразвука. Частицы вводились в жидкий смазочный материал (масло И-20А), который являлся поставщиком углеводов, необходимых для пленкообразования. Образование углеводородных радикалов в результате процессов превращения минерального масла при трении, в первую очередь, его окисления, взаимодействия с металлической поверхностью и изменения состава приповерхностных слоев в ходе пленкообразования были обнаружены и исследованы с помощью ИК-спектроскопии и электронно-зондового рентгеновского микроанализа. Перечисленные процессы, включая окисление масла до образования жирных кислот и их солей, явились той основой, на которой происходил процесс пленкообразования.

Для разработки модели описанного процесса попытаемся смоделировать его с помощью цепочки химических реакций, аналогично формулам (1)–(3). При этом, поскольку процесс предполагается более сложный и многостадийный, чем в рассмотренной выше системе, для моделирования может быть использована более подробная схема для описания критических явлений в химической кинетике, использованная в [19], – орегонатор. В качестве компонентов реакционной среды принимаются исходные углеводороды масла И-20А, атмосферный кислород и вода, адсорбированная на поверхностях интермедиатов:  $A = (nRC_2H_5 + nO_2 + nH_2O)$ . Концентрации интермедиатов обозначим, соответственно,  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , где  $X$  будет соответствовать концентрации вещества  $RC_2H_3 + RC_3H_2OH$  (олефин плюс альдегид),  $Y$  — концентрации  $D^*$  (наночастица, активированная деформацией),  $Z$  — концентрации  $C_2H_3COOD^*$  (частица, образовавшаяся с продуктом деструкции и окисления масла соль жирной кислоты, т. е. прототип мицеллы),  $D_0$  – пассивированная наночастица :



В приведенных соотношениях схематично отражены перечисленные выше процессы пленкообразования. Так, соотношение (9) описывает процесс первоначального окисления исходных алканов до олефинов и альдегидов с участием атмосферного кислорода и адсорбированной поверхностью воды. В (10) отражен процесс взаимодействия олефинов с активными центрами дисперсных частиц серпентина, в частности, с участием алюминия, приводящего к началу полимеризации. Соотношение (11) иллюстрирует процесс дальнейшего окисления олефинов и альдегидов, приводящий к образованию жирных кислот по схеме, описанной в [25]. Соотношение (12) отражает процесс полимеризации, катализируемый солью жирной кислоты, а (13) – образование хемосорбированной пленки, когда более активный металл вытесняет частицу серпентина. Объединенные в систему, данные соотношения показывают цепочку превращений, которые могут периодически повторяться при наличии достаточного количества исходных веществ. Отметим, что добавление в исходное масло солей жирных кислот, как это сделано в некоторых вариантах состава смазочной композиции, облегчает и ускоряет протекание описанных выше реакций.

Обобщая сказанное, констатируем, что система (13)–(17) описывает те химические превращения, которые были обнаружены с помощью ИК-спектроскопии и электронно-зондового рентгеновского микроанализа.

Полученная модель при переходе от стехиометрических соотношений к дифференциальным уравнениям будет полностью описываться приводимой ниже системой (18)–(20) с учетом введенных выше обозначений для величин  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

$$\partial X/\partial t = \kappa_1 A Y - Y \kappa_2 X + \kappa_{34} B X - 2\kappa_5 X^2; \quad (14)$$

$$\partial Y/\partial t = -Y(\kappa_1 A + \kappa_2 X) + f \kappa_6 Z; \quad (15)$$

$$\partial Z/\partial t = \kappa_{34} B X - \kappa_6 Z, \quad (16)$$

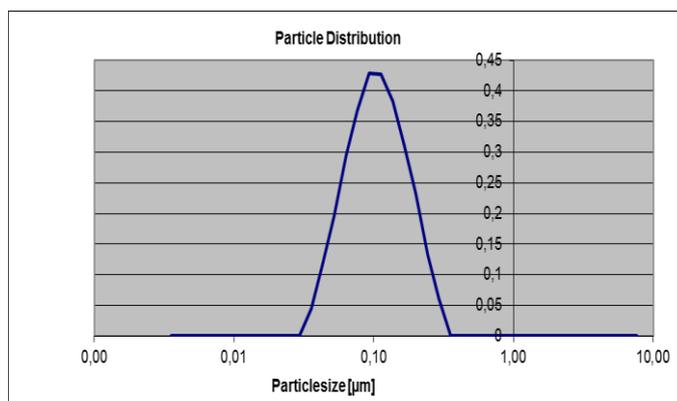
где  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_{34}, \kappa_5, \kappa_6$  – константы скоростей соответствующих реакций,  $A$ ,  $B$ ,  $f$  – коэффициенты, отражающие стехиометрические и диффузионные соотношения.

Для данной системы уравнений затруднительно получить такие же аналитические решения как, например, для уравнения (8), однако хорошо известны результаты качественного анализа и численного интегрирования подобных систем, приведенные, например, в [19]. Это, в первую очередь, фазовый портрет системы, представляющий собой предельный цикл в координатах  $(X, Y)$ , а также модель реакции системы на возмущающее внешнее воздействие, использованная ниже.

Для сопоставления выдвинутых гипотез и реального поведения трибосистем были поставлены и реализованы эксперименты по синтезированию и лабораторным исследованиям некоторых смазочных композиций, включающих наномодифицированные коллоидные растворы, способствующие процессу адаптивного пленкообразования.

В связи с этим для повышения эффективности процесса пленкообразования нами проводился процесс диспергирования в технологической жидкости, содержащей инграденты, необходимые для процесса коллоидообразования, например, раствор олеиновой кислоты в спирте при разной ее концентрации, и позволяющий контролировать процесс с помощью метода акустической спектроскопии, что дает возможность проводить процесс, практически, в любой технологической жидкости.

Пример проведения диспергирования с мобильным контролем дисперсности методом акустической спектроскопии показан на примере образцов, которые представляли собой мелкодисперсный порошок полититаната калия белого цвета в растворителе. Состав суспензии – 10 г полититаната + 95 мл изопропилового спирта + 5 мл олеиновой кислоты. Суспензия обрабатывалась ультразвуком с мощностью источника ультразвука 5 квт в течение 10 минут. Полученный коллоидный раствор исследовался на предмет распределения частиц полититаната калия по размерам. По результатам исследования построено распределение частиц. Измерение выполнено методом акустической (ультразвуковой) спектроскопии с использованием прибора PA Fast Sizer – 100. Пример распределения дан на рис. 2, по горизонтальной оси  $X$  – размер частиц (в микронах, логарифмическая шкала), по оси  $Y$  – объемная доля частиц данного размера (в процентах).



**Рис.2.** Пример распределения частиц по размерам. По горизонтальной оси X – размер частиц (в микронах, логарифмическая шкала). По оси Y – объемная доля частиц данного размера (в процентах)

Кроме того, рассматривались другие возможности для улучшения процесса пленкообразования. Как отмечается в литературе [26], наличие высокой дисперсности твердой составляющей суспензии не является гарантией устойчивости и эффективности функционирования смазочной композиции. В частности, высокодисперсные металлические порошки при отсутствии других компонент коллоидообразования не обеспечивают эффективного процесса пленкообразования и начинают проявлять себя только при достаточно высоких концентрациях [26]. В то же время, даже при отсутствии твердой составляющей в смазочной композиции процесс пленкообразования может давать заметный эффект при стимулировании трибополимеризации за счет образования радикалов из координационных соединений с последующим формированием сшитых сетчатых высокомолекулярных структур, удерживающих жидкую составляющую смазочного материала у поверхности трения [27].

В связи с этим исследовались возможности введения в получаемую суспензию пленкообразующих веществ, а также катализаторов, стимулирующих процесс пленкообразования [4,8,27]. К таким веществам можно отнести, например, эпоксидную смолу, введение которой в суспензию серпентина может осуществляться в растворе легкоиспаряющейся жидкости, например, этилового спирта. Для ускорения процесса пленкообразования в суспензию может также вводиться катализатор пленкообразования. Для случая использования эпоксидной смолы таким катализатором может быть отвердитель, вводимый в смазочный материал также в растворенном виде. В случае использования других пленкообразующих веществ, например, глицерина, который легко деструктурирует при трении, образуя радикалы, в качестве катализатора используются соли жирных кислот, которые являются классическими катализаторами процесса полимерообразования. Отметим, что в качестве пленкообразующего вещества могут быть использованы различные углеводородные жидкости. В частности, это может быть индустриальное масло, которое достаточно легко деструктурирует в процессе трения, как это было показано в [25]. Получаемые в результате деструкции радикалы и комплексы под каталитическим воздействием наночастиц (серпентина, ПТК и др.) и солей жирных кислот могут образовывать достаточно эффективные противоизносные пленки, прочно хемосорбированные с металлической поверхностью трущейся детали). То же относится и к моторным маслам, которые помимо углеводородов содержат также противоизносные присадки, содействующие пленкообразованию.

Для улучшения процесса коллоидообразования и последующего пленкообразования получаемая суспензия также обрабатывалась с помощью пропускания электрического тока с плотностью до 1кВт на мм<sup>2</sup>. При напряжении до 10 000 вольт это приводит к возникновению на ядрах мицелл электрического заряда и повышению их адсорбционной способности по отношению к имеющимся в суспензии поверхностно-активным веществам – жирным кислотам и солям жирных кислот. Подобные приемы известны в литературе [28].

В данной работе исследовалось масло М8 с добавкой нанодисперсного коллоидного раствора частиц полититаната калия (ПТК) в олеиновой кислоте с добавкой солей жирных кислот (СЖК), которое в табл. 1 обозначено как (М8+ПТК+СЖК). Эта композиция сравнивалась с чистым маслом М8, а также индустриальным маслом (И20А) и таким же маслом с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот, в табл. 1 - (И20+СС+СЖК).

**Таблица 1. Основные показатели прирабатываемости и нагрузочной способности сопряжений для рассматриваемых смазочных композиций**

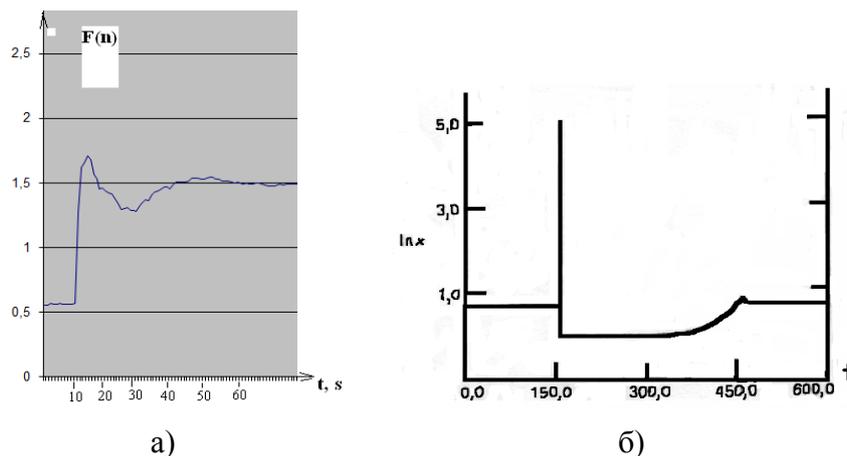
Состав смазочного материала	Максимальная нагрузка неприработанного сопряжения Р <sub>мп</sub> , МПа	Максимальная нагрузка приработанного сопряжения Р <sub>мп</sub> , МПа	Показатели прирабатываемости П и (в скобках) скорости роста нагрузочной способности, Р <sub>мп</sub> /b, МПа*с <sup>-1</sup>	Нагрузка, соответствующая минимуму коэффициента трения Р <sub>оп</sub> , МПа
И20+СС+СЖК	10	30	0,66(0,15)	18
М8+СПТК+СЖК	10	30	0,66(0,125)	20
М8	12	20	0,4(0,062)	12
И20А	6	9	0,33(0,05)	6

Процесс получения пленки происходил в ходе использования описанных выше смазочных композиций для смазывания пар трения типа «диск – три пальца» (диск – сталь, пальцы – латунь) в ходе триботехнических испытаний по ГОСТ 23.224-86, состоящих в первую очередь, в проведении приработки в режиме «на грани заедания», которые позволяют оптимальным образом оценить максимальную несущую способность испытываемого сопряжения, а также скорость роста этой нагрузочной способности в процессе приработки. Выбор методов испытаний основывался на необходимости анализа процесса пленкообразования, что невозможно при использовании четырехшариковой машины, рекомендуемой при традиционных методах анализа смазочной способности [2]. Современные тенденции в вопросах выбора испытаний смазочных материалов концентрируются на анализе физических процессов, протекающих при трении [29]. Реальный комплекс таких процессов наблюдается, как правило, при испытаниях в составе сопряжений, стендовых или лабораторных испытаниях, моделирующих те или иные реальные сопряжения, как это предлагается в обзоре методов испытаний моторных масел, где испытания на ЧШМ даже не упоминаются [30]. Это в особенности подчеркивается в работах, посвященных испытаниям наномодифицированных смазочных материалов, как это сделано в работе [31]. В связи с этим, рассматриваемые в данной работе испытания проводились в тройном сочетании материалов (конструкционных и смазочного), что предполагало моделирование конкретных сопряжений по ГОСТ 23.224-86 и оценка стандартного набора триботехнических характеристик сопряжений, включая прирабатываемость [3,4]. Оценивалось также поведение трибосистемы при внезапном приложении нагрузки для выявления действия обратной связи.

Перечисленные методы испытаний направлены, в первую очередь, на анализ адаптивности, возникающей в сопряжении при введении пленкообразующей смазочной композиции. Это выражается в возникновении отрицательной обратной связи при функционировании трибосистемы, в которой протекают процессы, описанные в уравнениях (14-16), и проявляется в процессе перерегулирования силы трения, что фиксируется триботехническими испытаниями. Наличие такой отрицательной обратной связи влечет за собой процесс регенерации пленки, что проявляется при анализе поверхности с помощью сканирующего туннельного микроскопа и профилографа. Наконец, триботехнические испытания по методике ГОСТ 23.224-86, в первую очередь, на прирабатываемость и определение областей нагрузки, соответствующих минимуму коэффициента трения, позволяют выявить интегральную адаптивность сопряжения, возникающую как следствие самоорганизованного пленкообразования.

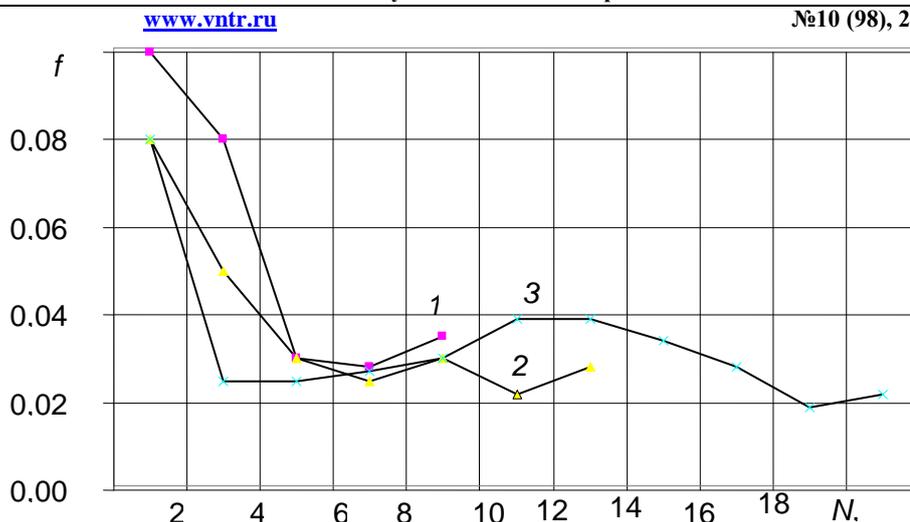
### Результаты экспериментальных исследований

Анализ поведения трибосистемы при внезапном приложении дополнительной нагрузки показан на рис.3. Изменение силы трения после приложения дополнительной нагрузки: а) эксперимент, трение в условиях образования нанометаллокомпозитной антифрикционной пленки; в момент  $t = 10$  сек. приложена нагрузка, сила трения, пройдя через максимум в момент  $t = 18$  сек, при снижении проходит через минимум в момент  $t = 32$  сек, а затем, приблизившись снизу к стационарному значению, стабилизируется; б) результат численного решения системы уравнений (14–16) при внезапном возмущении. Нетрудно видеть подобие в поведении нанокompозитной пленки, подвергнутой деформации трением, и модельной самоорганизующейся системы.



**Рис.3.** Изменение силы трения после внезапного приложения дополнительной нагрузки: а) эксперимент, б) результат численного решения системы уравнений (18),(19),(20) при внезапном возмущении

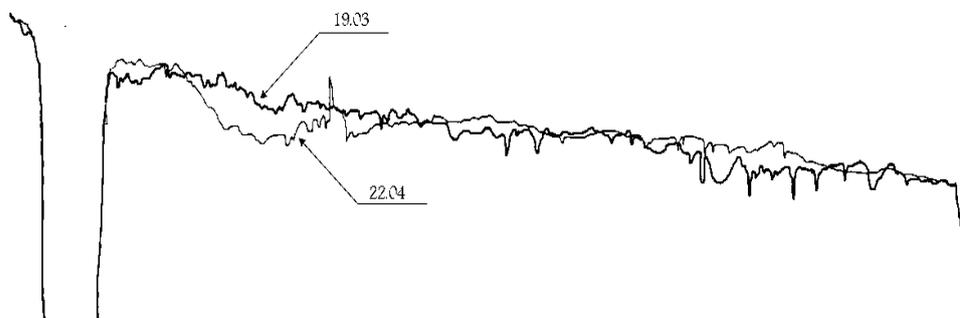
Поскольку коэффициент трения является интегральной энергетической характеристикой процесса трения и, в этом смысле, является аналогом функции  $\partial u / \partial \varepsilon = A - U(y)$ , графическое изображение которой приведено на рис.1. Исследование зависимости коэффициента трения в стационарных условиях от величины нормального давления в контакте позволило получить график, представленный на рис.4. Зависимость, обозначенная точками (x), соответствует трению с участием рассмотренной выше нанокompозитной пленки. Нетрудно видеть, что эта зависимость обладает двумя минимумами, что указывает на бистабильное поведение рассматриваемой системы, и наличие у нее по крайней мере двух стационарных состояний. Подобное бистабильное поведение характерно для самых различных видов трибосистем. В частности, форма зависимости коэффициента трения от нагрузки в виде «корыта» отмечалась еще Б.И. Костецким и в дальнейшем находила подтверждение у многих исследователей. Одним из наиболее свежих примеров бистабильного поведения является зависимость коэффициента трения от температуры, приведенная в работе [32].



**Рис.4.** Зависимость коэффициента трения от нагрузки для различных вариантов пленкообразования на трущихся поверхностях: 1(□) – процесс трения без пленкообразования; 2(△) – процесс трения со слабым пленкообразованием; 3(X) – процесс трения с пленкообразованием по предложенной модели (13)-(18)

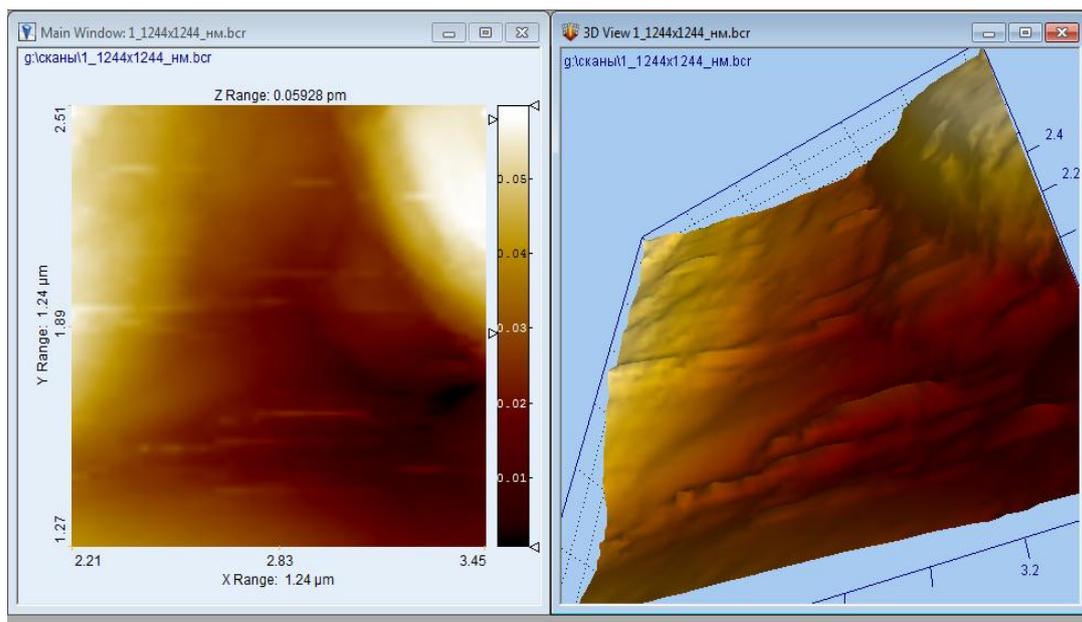
Таким образом, в рассмотренных экспериментах с адаптивными трибосистемами и в динамических системах, описываемых с помощью методов химической кинетики для критических явлений, может наблюдаться сложное поведение, соответствующее уровню самоорганизации. Это может быть использовано в технических целях для формирования способности к адаптации в технических объектах, в которых данные динамические системы будут применяться.

Качественное улучшение процесса пленкообразования позволило наблюдать новые синергетические эффекты при проведении триботехнических испытаний предложенного состава смазочной композиции по методике ГОСТ 23.224-86 по схеме «диск - три пальца». Это, в частности, выразилось в том, что при измерении износа методом профилографирования по ГОСТ 23.224-86 (прецизионный метод, обеспечивающий погрешность измерения износа не более 0,001 мкм) было обнаружено не уменьшение размера изнашиваемой детали, как это всегда наблюдается при испытаниях на износ, а наоборот – наращивание материала, то есть пленкообразование. Профилограммы, полученные до и после процесса пленкообразования и совмещенные с помощью компьютерной обработки, показаны на рис. 5. Цифры у профилограмм указывают даты, в которые они были сняты (в промежутке между этими датами происходило испытание образца). По краям профилограмм расположены метки.

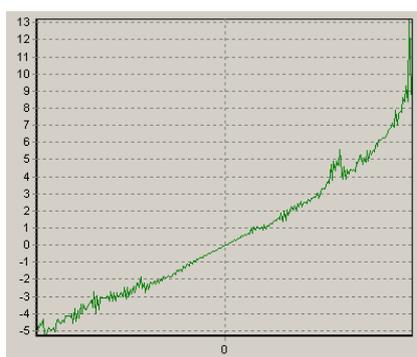


**Рис.5.** Профилограммы, полученные до и после процесса пленкообразования и совмещенные с помощью компьютерной обработки, снятые по коллинеарным меткам по ГОСТ 23.224-86. Цифры у профилограмм указывают даты, в которые они были сняты (в промежутке между этими датами происходило испытание образца)

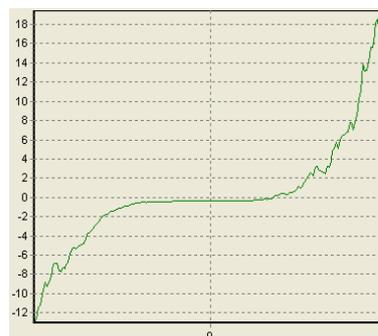
На рис. 6 и 7 показан анализ полученной пленки с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Он позволил выявить два эффекта. Первый – высокая степень выглаживания поверхности трения, что показано на рис.6. В левой части рисунка представлен скан поверхности трения, в котором высота рельефа показана цветом (основной вариант программы), а в правой части то же самое изображение представлено в объемном виде. При этом по всем трем осям (X, Y, Z) дана масштабная сетка, которая позволяет оценить как размер отсканированной площадки (1,24мкм\*1,24 мкм), так и изменения высоты рельефа, составляющие сотые доли мкм. Эффект выглаживания подтверждается рассмотренным ранее профилографированием (см. рис. 5).



**Рис.6.** Скан поверхности трения, в котором высота рельефа показана цветом (основной вариант программы), а в правой части то же самое изображение представлено в объемном виде, по всем трем осям (X, Y, Z) дана масштабная сетка, которая позволяет оценить как размер отсканированной площадки (1,24мкм\*1,24 мкм), так и изменения высоты рельефа, составляющие сотые доли мкм



а)



б)

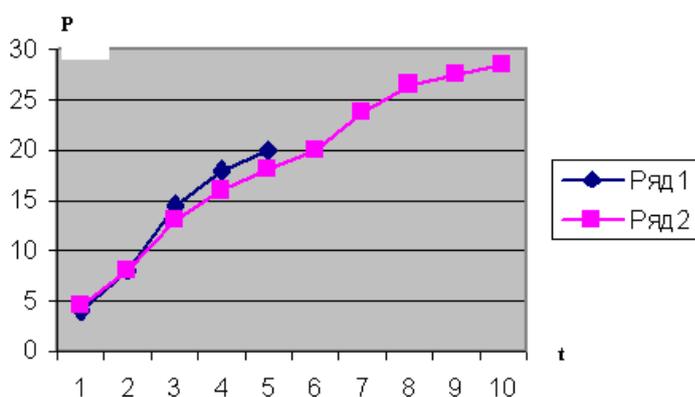
**Рис.7.** Вид вольт-амперной характеристики прохождения тока через область контакта микрозонда с поверхностью образца показан на рис.3 (а и б), где а) до трения (линейная характеристика), б) после трения при смазывании нанодисперсным составом (нелинейная характеристика, которая указывает на возникновение пленки сложного состава)

Второй эффект - наличие на поверхности трения вещества, механизм электрической проводимости которого, в отличие от основного материала поверхности трения (стали), не является металлическим [13,14]. Это наглядно видно из сопоставления двух вольт-амперных характеристик поверхности – до трения (линейный), и после трения (нелинейный, с возможностью оценить критическое значение напряжения, при котором возникает проводимость) вид вольт-амперной характеристики прохождения тока через область контакта микрозонда с поверхностью образца показан на рис.7 а и б, где а - до трения (линейная характеристика), б - после трения при смазывании нанодисперсным составом (нелинейная характеристика, которая указывает на возникновение пленки сложного состава).

Таким образом, экспериментально подтвержден синергетический эффект, получаемый в результате использования предложенного состава. Он проявляется в формировании пленки, возникающей в процессе трения, из составляющих смазочной композиции и позволяющей компенсировать износ пары трения и существенно повысить ее несущую способность. Последнее было подтверждено триботехническими испытаниями на прирабатываемость и задиростойкость, результаты которых представлены в табл. 1 и на рис. 8.

В таблице даны значения максимальной нагрузки для приработанного и неприработанного сопряжений  $R_{мн}$  и  $R_{мп}$ . Кроме того, рассчитан показатель прирабатываемости  $\Pi = (R_{мп} - R_{мн})/R_{мн}$ , а также показатель скорости роста несущей способности  $R_{мп}/b$ . В последнем столбце приводятся значения нагрузки, соответствующей критическому числу Зоммерфельда, то есть минимально допустимой толщине смазочной пленки и минимуму коэффициента трения, обозначенной  $R_{оп}$ . Кинетика роста несущей способности сопряжений  $P$  (МПа) в зависимости от времени приработки (масштаб оси времени: 1 = 50с) показана на рис. 8 и получена по описанной выше методике. На рис.5 отражены испытания со смазочными материалами, – ряд 1 - чистое моторное масло М8; ряд 2 - моторное масло М8 с добавкой суспензии наночастиц полититаната калия в олеиновой кислоте (ПТК).

Как видно из таблицы, рассмотренные показатели существенно возрастают после введения в смазочный материал модифицирующих добавок.



**Рис.8.** Кинетика роста несущей способности сопряжений  $P$  (МПа) в зависимости от времени приработки (масштаб оси времени: 1 = 50 с) ряд 1 - чистое моторное масло М8; ряд 2 - моторное масло М8 с суспензией ПТК и солями жирных кислот

Важным показателем долговечности является нагрузка  $R_{оп}$ , соответствующая переходу от условий гидродинамической смазки в область смешанной. Дело в том, что при использовании пленкообразующих материалов величина  $R_{оп}$ , как это показано выше, существенно возрастает. Это приводит к смещению области критического перехода от гидродинамической к смешанной смазке в сторону большей грузоподъемности. При этом возрастанию доли гидродинамической смазки при работе сопряжения ведет к

соответствующему снижению интенсивности изнашивания, которая в условиях гидродинамики падает практически до нуля. Поэтому разработка пленкообразующих смазочных материалов сегодня – эффективное направление трибологии, позволяющее существенно повысить ресурс многих машиностроительных конструкций [3,4,13].

В качестве примера можно рассмотреть возможность замены роликового радиально-упорного подшипника, используемого в качестве одной из опор червячного вала редуктора с нижним расположением червяка на подшипник скольжения с использованием наномодифицированного смазочного материала.

Для дополнительной оценки работоспособности подобного конструктивного решения может быть проведен расчет в соответствии с методикой [33], предполагающей сравнение предельно допустимого износа сопряжения со значением износа, рассчитываемого как произведение заданного ресурса, определенного в километрах пути трения, на интенсивность изнашивания сопряжения, причем последняя величина определяется экспериментально с воспроизведением эксплуатационных условий изнашивания.

Для определения интенсивности изнашивания проводился эксперимент, методика и описание которого дается в работах [3,13]. В эксперименте исследовалось поведение упорной (осевой) части подшипника, выполненного из цветного металла (латунь), поскольку по условиям эксплуатации именно эта составляющая радиально-упорного подшипника будет наиболее нагруженной, - осевое усилие на червячном валу равно окружному усилию на червячном колесе и в рассматриваемом случае составляет 4 кН. Число оборотов червячного вала принималось 600 об./ мин. Предельно допустимый износ определялся из условий выбора допустимого зазора в соответствующем радиально-упорном подшипнике (100 мкм для диаметра вала 40мм).

По результатам экспериментов определялась несущая способность сопряжения, а именно, – нагрузки  $R_{мп}$  – максимальная нагрузка приработки и нагрузка, соответствующая минимуму коэффициента трения при эксплуатационном числе оборотов. Они составили для сочетания сталь – латунь – индустриальное масло соответственно  $R_{мп} = 9$  МПа,  $R_{оп} = 6$  МПа, для того же сочетания с модифицированным маслом  $R_{мп} = 30$  МПа,  $R_{оп} = 20$  МПа. Поскольку осевая нагрузка на упорный подшипник составляла в эксплуатации 4 кН, или в пересчете на номинальное давление 5,2 МПа, то оба варианта оказываются принципиально допустимыми. Однако интенсивность изнашивания в условиях граничной смазки при смазывании маслом И20А составила  $6 \cdot 10^{-9}$ , при смазывании наномодифицированным маслом  $1 \cdot 10^{-11}$ . Соответственно при условии постоянной работы в условиях граничной смазки значение ресурса для первого случая составило 40 часов, для второго – 4000 часов.

В действительности, преимущество варианта с модифицированным маслом значительно больше, и это связано с уровнем прирабатываемости. Важным показателем прирабатываемости является величина  $P_0$ , определяющая критическое значение числа Зоммерфельда для перехода от гидродинамического режима к смешанной смазке при заданных значениях угловой скорости и вязкости масла. Определение этой величины регламентировано ГОСТ 23.215-84 и ГОСТ 23.224-86, она является важнейшим показателем прирабатываемости и грузоподъемности. Таким образом, для сопряжения с модифицированным смазочным материалом область перехода к граничной смазке лежит за пределами нагрузки 20 МПа, а такая нагрузка в эксплуатации заведомо невозможна по условиям работы. В тоже время, для сопряжения с обычным индустриальным маслом эксплуатационная нагрузка близка к значению  $R_{оп} = 6$  МПа, то есть в этом случае сопряжение работает преимущественно в условиях граничной и смешанной смазки, а значит интенсивность изнашивания в эксплуатационных условиях будет  $6 \cdot 10^{-9}$ , что следует считать неудовлетворительным. В то же время, для сопряжения с модифицированным маслом условия граничной смазки наступят лишь при нагрузке более 18 МПа, что невозможно, либо в переходный период, который должен составлять по времени не более 10% от общего времени работы. То есть при максимально допустимом износе в 100 мкм и интенсивности

изнашивания в условиях граничной смазки, общий ресурс сопряжения составит не менее 40 000 часов, что для данного узла является достаточно высоким показателем.

Таким образом, при подборе сочетаний конструкционных и смазочных материалов, особенно в случаях, когда работа составленного из них сопряжения происходит в условиях смешанной смазки, необходимо стремиться к созданию условий для процесса пленкообразования на контактирующих поверхностях. Как правило, этот эффект достигается при использовании пленкообразующих смазочных материалов. Однако выбор среди смазочных материалов должен производиться по результатам триботехнических испытаний с обязательным воспроизведением кинематики реального узла трения и определением таких показателей прирабатываемости, как П, Рмп, Роп, причем последние два показателя должны сравниваться со значениями нагрузок, действующими в эксплуатации. После проведения приработочных испытаний проводится оценка интенсивности изнашивания в стационарных условиях. При этом интенсивность изнашивания должна использоваться для расчета ресурса сопряжения с учетом реального режима эксплуатации, в первую очередь, режима нагружения и режима изменения скорости относительного скольжения, в том числе, периодичности и длительности режимов пусков и остановки.

Лабораторные испытания были дополнены натурными эксплуатационными испытаниями, которые проводились на двигателях легковых автомобилей ВАЗ.

Отметим, что эксплуатационные испытания на работающих двигателях давно используются для оценки эффективности наномодифицированных смазочных материалов, что присутствует и в новых работах в этой области [30,34,35]. В нашем случае, эти испытания позволяют не только подтвердить расширение адаптационных свойств в смысле процесса пленкообразования, но продемонстрировать новые свойства у исследуемых в эксплуатации изделий, например, ДВС. В частности, по изменению давления сжатия в цилиндрах ДВС можно судить о степени изношенности соответствующего сопряжения, на чем основан соответствующий способ измерения износа, отраженный в ГОСТ 23.224-86.

Испытания проводились на испытательной базе НПЦ «Конверс-ресурс» под руководством Хазова С.П. Результаты проведения испытаний и диагностических работ на автомобилях ВАЗ 2013 и ВАЗ 2004 и обработки двигателей по безразборной технологии нанодисперсным противоизносным составом с полититанатом калия представлены ниже.

Прибор для замера давления сжатия в цилиндрах: ручной «МОТОМЕТЕР» с регистрацией на бумаге посредством чернил, с интервалом измерения от 0 до 17 бар, с точностью 0,25 бар. Анализатор выхлопных газов: анализатор TEXA-Pegaso. Расход топлива определялся по длине контрольного пути в км по показанию штатного спидометра при кольцевом движении со скоростью 40-50 км/час при выработке мерного количества топлива в количестве 1л.

Объекты испытаний:

Автомобиль ВАЗ-2013. Гос.№ Е728КЕ97. Двигатель ВАЗ 2011. Год выпуска – 2003

Пробег к моменту обработки 40 000 км. Пробег после обработки 40 535 км.

Пробег после восстановления трибосоставом с ПТК (№2 по табл. 2) составил 535 км.

#### Показатели параметров двигателя

##### 1. Давление сжатия в цилиндрах до обработки

	Контрольный замер – 28.05.2013г.			
Номера цилиндров	1	2	3	4
Давление сжатия по цилиндрам, бар	7,2	8,0	9,2	9,0

##### 2. Давление сжатия в цилиндрах после обработки

	Контрольный замер – 4.06.2013 г.
--	----------------------------------

Расход масла (по данным водителя)	снизился			
Расход топлива при городском режиме	уменьшился			
Номера цилиндров	1	2	3	4
Давление сжатия по цилиндрам, бар	8,0	10,0	9,8	10,1

## 3. Расход топлива

Мерный расход топлива, 1 л	Пройденный путь, км	Процентное отношение
До обработки	6,8	
После обработки трибосоставом с полититанатом и пробега 535 км	7,8	15%

4. Замеры выхлопных газов относятся к измерениям, осуществляемым в следующих условиях: температура жидкости охлаждения 70°C; нагрузка на холостом ходу (минимально возможная); число оборотов: 1000 об/мин (минимальное).

ЗАМЕРЫ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ	До обработки	После обработки	Абсолютное различие с последними измерениями	Процентное различие с последними измерениями
Путь*, пройденный с НПС полититанатом, км	0 м	535000м		
Дата измерения	28/05/13	04/06/13		
Температура среды (°C)	30	28		
Атмосферное давление (mBar)	1017	1009		
Температура охлажд. жидкости (°C)	70	70		
CO (%VOL)	6.97	4.47	-2.5	-36 %
CO2 (%VOL)	8	9.9	1.9	24 %
HC (PPM VOL)	557	498	-59	-11 %

\* Замеры выхлопных газов осуществлены на горячем двигателе в условиях испытаний до обработки и после обработки и пробега 535 км при испытаниях на потребление горючего.

Результаты свидетельствуют об уменьшении CO на 36 % и HC на 11 %. Увеличение значения CO<sub>2</sub>, которое не является загрязняющим и вредным для здоровья газом, оправдана улучшением процесса горения за счет процесса пленкообразования.

Выводы.

1. Рассмотрены теоретические и методические основы формирования защитных смазочных пленок на основе наноструктурно-модифицированных добавок (неорганических полимеров типа полититаната калия) к смазочному материалу.

2. Показано, что формирование пленок на основе предложенных добавок как самоорганизующийся процесс должен обладать асимптотической устойчивостью, то есть в техническом отношении пленки должны иметь свойство адаптироваться к внешним воздействиям.

3. Получены прямые экспериментальные подтверждения процесса пленкообразования на поверхностях трения в лабораторных триботехнических испытаниях

благодаря использованию добавки к смазочному маслу коллоидного раствора полититаната калия.

4. Получены экспериментальные подтверждения адаптивного поведения сопряжения, смазываемого композицией, содержащей указанную пленкообразующую добавку.

5. Результаты лабораторных испытаний подтверждаются результатами эксплуатационных испытаний той же добавки в составе моторного масла в двигателе внутреннего сгорания.

6. Полученные результаты показывают, что процесс пленкообразования позволяет получить новое свойство для сопряжений скольжения – адаптивность к внешним воздействиям, что выражается в существенном повышении прирабатываемости сопряжений в лабораторных условиях и компенсации процесса изнашивания в эксплуатационных испытаниях, а именно – повышению компрессии и улучшению процесса сгорания.

### Список литературы

1. Дьяков В.А., Воскресенский В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). М. Машиностроение, 1980. – 224 с.
2. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочник. Под ред. Школьников В.М. М.: Химия. 1999. 596с.
3. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Лычагин В.В., Гончаров С.Ю., Черторыльский И.С. Критерии работоспособности и выбор материалов для опор скольжения с учетом свойств смазочных материалов. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013, № 5, с.81–89.
4. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. Монография. М.: Изд-во РГАУ-МСХА.2009. 108с.
5. Барабаш М.Л., Корогодский М.В., Краюшкина А.С., Федотов Ф.А. Применение металлоколлоидных смазок (органических соединений железа) для приработки деталей автомобильного двигателя. В сб. Повышение износостойкости и срока службы машин. Изд-во АН УССР. Т.2. Киев. 1960. С. 249–261.
6. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирующие смазочные материалы // Долговечность трущихся деталей машин. М. Машиностроение. 1988. Вып. 3. С. 96–143.
7. Паренаго О.П., Бакунин В.Н., Кузьмина Г.Н.. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах // Российский химический журнал, 2003, № 2, с. 45–50.
8. Люты М., Костюкович Г.А., Скаскевич А.А. и др. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами // Трение и износ. 2002. № 4 (23), с. 411–424.
9. Гороховский А.В., Палагин А.И., Аристов Д.В. Субмикро- и наноразмерные титанаты калия и перспективы их применения // Нанотехника. № 4 (20), 2010, с. 90–94.
10. Сафонов В.В., Гороховский А.В., Палагин А.И., Азаров А.С, Аристов Д.В., Хорюков С.И. Трибологические свойства антифрикционных суспензий на основе нанопорошков полититаната калия // Нанотехника. № 4 (20), 2010, с. 94–96.
11. Цыганок С.В., Лихтерова Н.М., Чулков И.П. Исследование влияния концентрации добавки геомодификатора – лизардита на трибологические характеристики смазки ЦИАТИМ-201 // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014, № 8, с. 35–37.
12. Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Глазунова Е.А. Трибохимия слоистых силикатов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013, №10, с. 15–19.
13. Поляков С.А., Хазов С.П., Соколов И.В., Зайцева К.В. Разработка нанодисперсных противозносных составов для повышения динамической адаптации и

- эксплуатационных показателей дизель-генераторных установок // Нанотехника. 2008. N 4(16), с. 50–56.
14. Поляков С.А., Черторыльский И.С., Куксенова Л.И. Влияние модифицирования смазочных материалов на триботехнические характеристики сопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012, № 5, с. 41- 46.
  15. Быков В.И., Поляков С.А., Черторыльский И.С. // Нанотехника. 2011. № 4 (20), с. 94–96.
  16. Поляков С.А., Куксенова Л.И. Разработка методов стимулирования динамической адаптации трибосистем // Известия Самарского научного центра РАН. 2011, том 13, № 4, с.853–856.
  17. Суздальев И.П. Нанотехнология – физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М. КомКнига, 2006. 592 с.
  18. Алфимов М. В., Кадушников Р. М., Штуркин Н. А. и др. Имитационное моделирование процессов самоорганизации наночастиц. Российские нанотехнологии, том 1, № 1–2, 1–7, 2006.
  19. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М. Мир. 1979. 512 с.
  20. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М. Едиториал УРСС. 2002. 360 с.
  21. Еленин Г.Г. Нанотехнологии, наноматериалы, наноустройства. В кн. Синергетика: исследования и технологии М. Либроком. 2009. с.82–126.
  22. Тринеева В.В., Кодолов В.И., Хохряков Н.И. Исследование процессов образования металлуглеродных нанокompозитов в нанореакторах полимерных матриц и методы оценки влияния их сверхмалых количеств на материалы. Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству – 2010». Фрязино. 2010. Изд-во «Янус-К», с. 44–45.
  23. Быков В.И. Моделирование критических явлений в химической кинетике. М. Комкнига. 2007. 328 с.
  24. Поляков С.А. Нанотехнологические методы создания трибосопряжений, способных динамически адаптироваться к условиям эксплуатации // Нанотехника. 2009. N 4 (20), с. 81–86.
  25. Поляков С.А., Хазов С.П. О механизмах взаимодействия нанодисперсных частиц серпентина с жидким углеводородным смазочным материалом в начальный период трения // Нанотехника. 2007. № 3 (11). С. 98–105.
  26. Кужаров А.С. и др. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Пленкообразование для нанодисперсных реметаллизантов // Трение и износ. 2015. № 1, с.21–28.
  27. Пономаренко А.Г., Бурлов А.С., Бойко М.В. Исследование трибохимических процессов в смазочных композициях, содержащих координационные соединения переходных металлов // Трение и износ. 2015. № 1, с.62–68.
  28. Аулин В.В. Влияние комбинированного физико-химического модифицирования моторного масла на изменение момента трения и потребляемой мощности в сопряжениях образцов и деталей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014, № 2, с. 21–28.
  29. Короткевич С.В., Бобович С.О., Пинчук В.Г. Разработка критерия оценки смазочной способности и противозадирных свойств пластичных смазочных материалов и масел при граничном трении. Тяжелое машиностроение. 2014, № 4-5, с. 39–45.
  30. Шаталов К.В., Яковлев А.В., Шишаев С.В. Методы оценки эксплуатационных свойств моторных масел для тяжело нагруженных дизельных двигателей // Двигателестроение, № 4. 2014, с.37–42.
  31. Алисин В.В., Покидько Б.В., Рошин М.Н., Смакова Г.А. Зависимость триботехнических характеристик смазываемых поверхностей от содержания катионных модификаторов с наночастицами алюмосиликатов в смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014, № 1, с. 15–20.

32. Буяновский И.А., Лобова Т.А., Марченко Е.А. Влияние мелкодисперсных порошков диселенидов вольфрама и молибдена на антифрикционные свойства некоторых промышленных масел // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015, № 3, с. 18–23.
33. Дроздов Ю.Н., Юдин В.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). Под ред. Ю.Н. Дроздова. – М.: «Эко-Пресс», 2010. 604 с.
34. Остриков В.В., Зимин А.Г., Попов С.Ю., Сафонов В.В. Многофункциональная добавка к моторным маслам // Двигателестроение. № 2 (256), 2014, с. 32–34.
35. Перекрестов А.П., Чанчиков В.А., Гужвенко И.Н. Применение модифицированных смазочных материалов для повышения износостойкости деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля // Вестник машиностроения. № 12, 2014, с. 57–59.