

*Н. В. Зиновьев, П. В. Харламов*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

**Аннотация.** В работе представлен вариант структуры смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения. Также представлена матрица планирования полнофакторного эксперимента с учетом комбинаций концентраций компонентов. Учитывая специфику открытых динамически нагруженных фрикционных пар, установлено, что для данных трибосистем наиболее эффективным будет использование твердопластичного смазочного материала. Согласно предлагаемому подходу совершенствование смазочных материалов должно идти по пути улучшения структуры и комплекса вторичных свойств новых смазочных композиций, поскольку структуру смазочного материала определяют в основном строение и комплекс механических, химических и теплофизических свойств образующего загустителя трехмерного каркаса в объеме смазочного слоя и связанного с каркасом двумерного несущего пористого слоя на поверхности трения.

**Ключевые слова:** смазочный материал, структура, загуститель, концентрация компонента, поверхность трения, рецептура смазочного материала.

**Для цитирования:** Зиновьев, Н. В. Определение компонентов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения / Н. В. Зиновьев, П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 205–213. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_205.

### **Введение**

В современных условиях энергоэффективность и энергосбережение становятся приоритетными направлениями развития. Реализация государственной политики в сфере внедрения энергосберегающих технологий охватывает все отрасли экономики.

ОАО «РЖД» активно участвует в этом процессе, реализуя комплекс мер по рациональному использованию ресурсов на железнодорожном транспорте. Компания систематически проводит мероприятия, направленные на оптимизацию энергопотребления и эффективное использование материальных ресурсов в своей деятельности [1, 2].

Ключевыми задачами ОАО «РЖД» выступают:

- развитие перспективных транспортных потоков;
- обеспечение надёжной безопасности движения;
- совершенствование использования топливно-энергетических ресурсов;
- оптимизация взаимодействия между службами путевого хозяйства и подвижного состава.

Особую значимость приобретает проблема взаимодействия между железнодорожным полотном и подвижным составом. Колёсно-рельсовый контакт представляет собой необходимый физический процесс, обеспечивающий движение поездов. Этот процесс играет решающую роль в обеспечении безопасности перевозок и напрямую влияет на ключевые показатели эффективности [1, 2]:

- грузоподъёмность составов;
- скоростные характеристики;
- величину эксплуатационных затрат.

Таким образом, совершенствование взаимодействия пути и подвижного состава является одним из приоритетных направлений развития железнодорожной отрасли.

Применение смазки, благодаря снижению силовых сопротивлений при движении состава по железнодорожным путям, обеспечивает целый ряд важных преимуществ: существенное сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов, необходимых для тяги поездов; значительное увеличение срока службы как колёсных пар, так и рельсового полотна; минимизация риска вкатывания колеса на головку рельса; улучшение экологических показателей железнодорожного транспорта; существенное снижение шумового загрязнения окружающей среды.

Стоит отметить, что технология лубрикации представляет собой комплексное решение, направленное на повышение эффективности и безопасности железнодорожного транспорта. На основе изучения эксплуатационных качеств и трибологических параметров был сделан важный вывод о необходимости модернизации смазочных материалов, которые используются в экстремальных условиях работы трибосистем [2–4].

Исследовательская работа специалистов должна быть сфокусирована на создании инновационных смазочных составов со следующими характеристиками:

- использование доступных компонентов в производстве;
- соответствие строгим требованиям экологической безопасности;
- обеспечение максимальной эффективности работы деталей при разных типах трения;
- оптимальная адаптация к условиям трения скольжения и трения качения.

Следовательно, главной задачей современной изобретательской деятельности становится разработка передовых смазочных материалов, которые способны:

- эффективно функционировать в сложных эксплуатационных условиях;
- сохранять высокие показатели работоспособности;
- соответствовать современным экологическим стандартам;
- обеспечивать надёжную защиту деталей при различных видах трения.

Особенно перспективным является направление создания смазочных материалов, получаемых на базе фундаментальных разработок в области нанотехнологий.

С учетом специфики открытых динамически нагруженных узлов трения установлено, что для данных трибосистем наиболее эффективным будет использование твердопластичного смазочного материала-покрытия. Структура разрабатываемого смазочного материала представляет собой многокомпонентную коллоидную систему (дисперсию), которая включает дисперсионную среду (основу), дисперсную фазу (загуститель), добавки (присадки и наполнители) [5–7].

### *Теоретическая часть*

В соответствии с выполненным анализом априорной информации и предварительными исследованиями для изготовления опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения были выбраны следующие материалы:

- дисперсионная среда (основа) – битум;
- дисперсная фаза (загуститель) – высокодисперсный диоксид кремния;
- добавки (наполнители) – графит, дисульфид молибдена.

Дисперсионная среда выступает в качестве фундамента для всех смазочных материалов. Несмотря на то что ключевые рабочие параметры смазок определяются типом используемого загустителя, дисперсионная среда также играет важную роль в формировании их характеристик. Химический состав, групповая и фракционная структура дисперсионной среды напрямую влияют на процесс формирования структуры материала и эффективность загущения. Это, в свою очередь, отражается на основных показателях текучести и вязкости смазочных материалов. Выбор дисперсионной среды играет ключевую роль в процессе производства смазочных материалов и определяет необходимость строгого соблюдения норм пожарной безопасности и промышленной санитарии.

После тщательного анализа было принято решение использовать в качестве несущей основы нефтяной битум. Нефтяные битумы представляют собой продукт переработки смолистой нефти и являются высокомолекулярными органическими соединениями.

По своей структуре это могут быть как твёрдые, так и жидкие вещества, состоящие из:

- углеводов;
- сернистых производных;
- кислородных соединений;
- азотистых соединений.

Такое комплексное строение обеспечивает битумам необходимые эксплуатационные характеристики для использования в качестве дисперсионной среды в современных смазочных материалах.

Загустители (дисперсная фаза) обладают важным свойством – способностью к агрегированию. Это процесс, при котором микрочастицы материала соединяются между собой, формируя бесформенные цепочки под влиянием молекулярных сил.

В результате такого взаимодействия в смазочном материале создаётся особая трёхмерная структура – пространственный каркас. Этот каркас играет ключевую роль в работе смазочного материала: дисперсионная среда (основная часть смазки) проникает в пористую структуру загустителя, одновременно с этим, около 60–80 % основы удерживается в ячейках каркаса благодаря капиллярным эффектам, а также силам адсорбции. Оставшаяся часть дисперсионной среды фиксируется в структуре механическим способом. Таким образом, образуется сложная система, где трёхмерный каркас из агрегированных частиц загустителя эффективно удерживает основную массу смазочного материала, обеспечивая его стабильное функционирование [6, 7]. Под воздействием загустителя жидкая основа становится малоподвижной, по-

добно твердому телу, не меняет своей формы под собственным весом и начинает течь лишь под воздействием нагрузок, превышающих некоторый предел их прочности.

Согласно новому подходу к разработке, улучшение смазочных материалов должно быть направлено на оптимизацию их структуры и совершенствование вторичных характеристик. Ключевым фактором в формировании структуры смазочного материала выступает трёхмерный каркас, создаваемый загустителем в объёме смазочного слоя. Этот каркас взаимодействует с двумерным пористым слоем на поверхности трения.

Для создания эффективного смазочного материала необходимо использовать загуститель с комплексом важных свойств:

- высокая механическая прочность структуры;
- термостабильность в условиях трения;
- оптимальные показатели тепло- и электропроводности;
- высокая энергоёмкость материала;
- способность к эффективному отводу тепла из зоны трения;
- сохранение необходимых реологических характеристик.

Только при соблюдении этих требований возможно создание современного смазочного материала, способного эффективно работать в сложных условиях эксплуатации и обеспечивать надёжную защиту трущихся поверхностей.

Таким образом, разработка новых смазочных композиций требует комплексного подхода к выбору загустителя и учёта всех его физико-химических характеристик для достижения максимальной эффективности работы смазочного материала.

В качестве дисперсной фазы (загуститель) при изготовлении смазочного материала предпочтение было отдано применению твердых неорганических материалов, характеризующихся высокой дисперсностью, обладающих способностью к образованию первичного структурного каркаса смазочного материала и быстрому восстановлению связей между частицами после их разрушения и деформации. С этой целью было решено использовать высокодисперсный диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) (торговые названия: аэросил, орисил, белая сажа, HDK, кремнезем и т.д.).

Свойства смазочных материалов, загущенных высокодисперсным диоксидом кремния, существенно зависят от химического состояния поверхности  $\text{SiO}_2$ , в частности от концентрации поверхностных гидроксидов, модифицирующих групп, pH спиртоводной вытяжки диоксида кремния, количества физически и координационно связанной воды и других факторов.

Частицы диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), введенные в состав смазочного материала, в результате сил притяжения формируют пространственный наноструктурный каркас, в ячейках которого удерживается смазочный материал. Таким образом, осуществляется сильное загущающее действие. В результате того, что диоксид кремния имеет чрезвычайно маленькие размеры частиц с высокой удельной поверхностью, его загущающее действие имеет значительный эффект даже при малых концентрациях дисперсной фазы в дисперсионной среде [1–3].

Введение в состав разрабатываемого смазочного материала диоксида кремния позволит легко и быстро добиться необходимой консистенции смазочного материала (твердопластичного смазочного материала-покрытия), придать ему необходимую форму и сохранять его физико-химические и механические свойства на протяжении длительного времени, во время хранения и транспортировки. Применение данного загустителя позволит смазочному материалу сохранять необходимые эксплуатационные характеристики при температурных воздействиях от  $-50$  до  $+150$  °C.

Одновременно с этим наличие большого количества сверхмалых частиц изменяет свойства смазочной пленки и характер взаимодействия поверхностей трения, повышая несущую способность и устойчивость к интенсивным контактным нагрузкам (табл. 1).

Таблица 1

**Физико-химические показатели высокодисперсного диоксида кремния HDK  
марки N20 производства фирмы «WACKER»**

Показатель	Норма
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	$200 \pm 30$
pH 4 % дисперсии	3,8 – 4,3
Плотность набивки, г/л	40
Потери при сушке, 2 часа при 105 °C, %	< 1,5
Остаток на сите по Моккеру, 40 мкм, %	< 0,04

В процессе внедрения наночастиц в зону трения происходит целый ряд важных преобразований. Микроуглубления и микровпадины на поверхности трения заполняются наночастицами, что способствует формированию замкнутых линз и упрочнению поверхностного слоя. Этот процесс особенно активно проявляется во время приработки механизмов и помогает «залечивать» микродефекты на сопрягаемых поверхностях.

Благодаря сильной поляризации наномолекул на поверхностях трения формируется особая самоорганизующаяся плёнка. Её оптимальная геометрия и достаточная толщина (40–80 нм) значительно повышают несущую способность сопряжений. В результате поверхности трения надёжно разделяются, практически исчезают явления адгезии, что приводит к компенсации износа деталей и повышению точности работы кинематических пар.

Сформированная плёнка из наночастиц впоследствии пропитывается смазочным материалом, который невозможно удалить с поверхности.

Особую роль в улучшении характеристик смазочных материалов играют наполнители – тонкодисперсные твёрдые добавки. Они не растворяются в маслах и не создают коллоидной структуры, а формируют самостоятельную дисперсную фазу в пластичных смазках. Эти компоненты особенно эффективны в тяжело нагруженных машинах и механизмах, работающих при высоких давлениях и температурах.

При разработке современных смазочных материалов важно не только улучшать отдельные показатели качества, но и создавать системы, которые будут сохранять свою структуру и стабильность на протяжении длительного времени. Это особенно актуально при введении различных присадок и наполнителей в состав смазочных материалов.

Для изготовления наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения были выбраны наиболее распространенные слоистые наполнители, характеризующиеся низким коэффициентом трения: графит и дисульфид молибдена.

Графит – уникальное вещество, которое внешне представляет собой твёрдое тело тёмно-серого цвета с характерным металлическим блеском. Его структура может быть аморфной, кристаллической или волокнистой. На ощупь материал отличается жирностью и способностью оставлять следы на поверхностях.

Одной из примечательных особенностей графита является его способность создавать тончайший защитный слой при контакте с твёрдыми поверхностями. Это свойство обусловлено особой молекулярной структурой материала. С точки зрения химии графит – это аллотропная модификация углерода, обладающая уникальной гексагональной кристаллической решёткой. Её строение характеризуется наличием параллельных слоёв, которые состоят из правильных шестиугольников, образованных атомами углерода. В каждом слое атомы углерода формируют прочную структуру: каждый атом связан с тремя соседями посредством ковалентных связей на расстоянии 0,14 нм. При этом сами слои располагаются на расстоянии 0,34 нм друг от друга.

Особую роль в свойствах графита играют свободные электроны, которые не привязаны к конкретным атомам. Они свободно перемещаются между слоями, создавая так называемую металлическую связь (рис. 1). Именно эта особенность определяет многие характерные свойства материала, присущие металлам. Слои плотно упакованных атомов углерода разделены большими расстояниями [7].

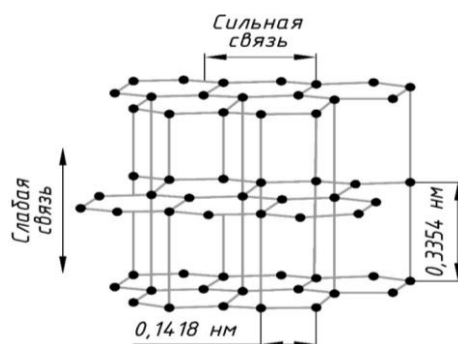


Рис. 1. Кристаллическая структура графита

Теоретическая плотность графита составляет  $2270 \text{ кг/м}^3$ ; твердость по Моосу в слое вдоль оси С – 5,5 и выше; по термической стабильности графит превосходит дисульфид молибдена; температура плавления –  $3859 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , сублимации –  $2700 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент трения – менее 0,1 [7].

Уникальное свойство графита – его исключительная твёрдость в направлении, перпендикулярном слоям кристаллической решётки, сопоставимая с твёрдостью алмаза. Благодаря этому частицы графита способны эффективно внедряться в металлическую поверхность без разрушения.

Именно эта особенность объясняет, почему при использовании графитовой смазки практически полностью исключается прямой металлический контакт трущихся поверхностей. Даже при значительных нагрузках и существенной деформации поверхностных слоёв относительное перемещение происходит либо под защитной плёнкой смазочного материала, либо внутри неё.

Важнейшими характеристиками графита, определяющими его широкое применение в промышленности, являются его пластичность и особая «жирность». Эти свойства напрямую влияют на эффективность использования графита в качестве смазочного материала. Чем выше степень «жирности» графита, тем ниже коэффициент трения между контактирующими поверхностями.

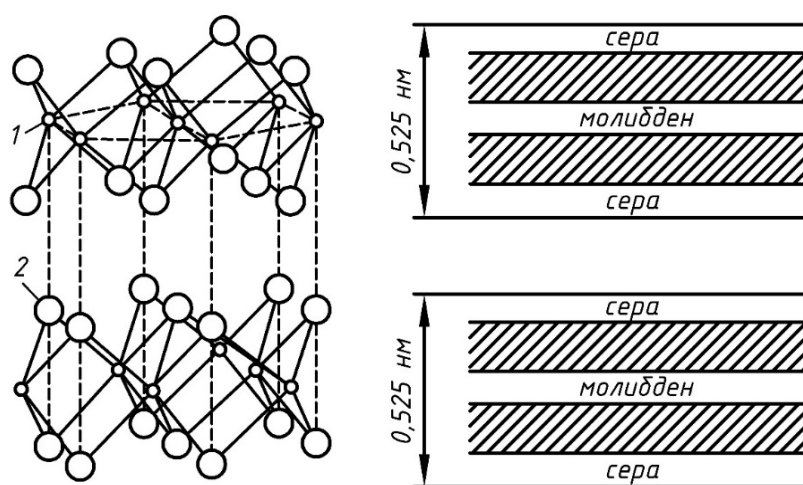
Способность графита прилипать к твёрдым поверхностям и создавать тончайшие защитные плёнки при нанесении делает его незаменимым материалом для формирования надёжного смазочного слоя. Это свойство позволяет эффективно защищать трущиеся элементы механизмов от износа и обеспечивать их бесперебойную работу.

При изготовлении опытных образцов разрабатываемого смазочного материала был использован графит марки ГС-4, вырабатываемый по ГОСТ 8295–73. Его применение способствует образованию структурного каркаса и стабилизации структуры смазочного материала, проявляя свойства дополнительного загустителя. Помимо качеств загустителя графит, введенный в состав смазочного материала в качестве наполнителя, повышает его антифрикционные, противоизносные и плакирующие свойства.

Введение графита в состав смазочного материала задаст необходимую нагрузочную способность и долговечность слою смазочного материала при высоких удельных нагрузках, т. к. графит является достаточно прочным на сжатие материалом и плохо сопротивляется сдвигу. Графит является широко доступным материалом с относительно низкой стоимостью.

Для получения комплекса требуемых свойств у разрабатываемого смазочного материала весьма перспективным является совместное введение в его состав графита и дисульфида молибдена. Дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) – порошок черного с сероватым оттенком цвета (рис. 2). Применяется как компонент твердых и жидких смазочных материалов, в том числе предназначенных для эксплуатации при высоких температурах (до  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ). Природный  $\text{MoS}_2$  кристаллизуется в гексагональную форму и имеет слоистую структуру. Искусственно полученный  $\text{MoS}_2$  имеет также слоистую структуру, но либо ромбоэдрической, либо промежуточной между гексагональной и ромбоэдрической формы.

В отличие от графита дисульфид молибдена обладает более высокими антифрикционными свойствами, физическая адсорбция атомов или молекул при оптимальной концентрации адсорбированных частиц и их высокой подвижности по базисным плоскостям  $\text{MoS}_2$  может еще больше снижать значение коэффициента трения.



**Рис. 2. Кристаллическая структура дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$ :** единичные пластинки состоят из чистого молибдена или чистой серы, расстояние между которыми  $0,36\text{ нм}$  и связь относительно слабая: 1 – атомы молибдена; 2 – атомы серы [7]

**Практическая часть**

Выбор экспериментальной области факторного пространства связан с тщательным анализом априорной информации. В этой области находят локальную подобласть для планирования эксперимента. Далее при составлении плана эксперимента зададим число уровней и интервалы варьирования факторами. В многофакторных экспериментах, основанных на дисперсионном анализе, обычно принимают три уровня факторов (верхний, нулевой (основной) и нижний) [8–10].

Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по данному технологическому параметру. Граничные значения входных факторов (верхний и нижний уровни) были подобраны согласно проведенному аналитическому обзору литературных и патентных источников (табл. 2).

Таблица 2

**Области исследований варьируемых параметров**

Входные факторы	Основной (нулевой) уровень, $x_{0i}$	Интервал варьирования, $\Delta x_i$
Концентрация диоксида кремния ( $x_1$ ), %	7	3
Концентрация графита ( $x_2$ ), %	15	5
Концентрация дисульфида молибдена ( $x_3$ ), %	5	4

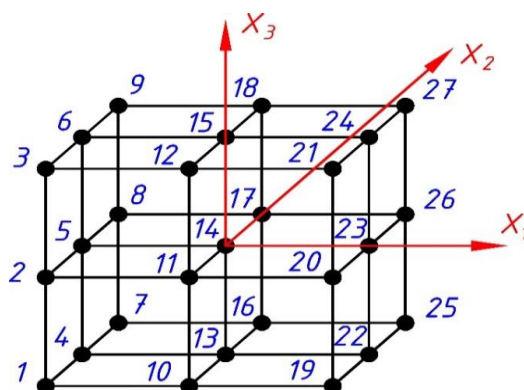
При планировании по схеме полного факторного эксперимента реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Число этих комбинаций определяет тип планирования [9].

Кодированный план полного трехфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования факторов ( $3^3$ ) геометрически может быть представлен в виде куба, где каждая комбинация факторов (точка) представляет собой отдельное сочетание концентраций компонентов и, соответственно, отдельный опытный образец (рис. 3).

Таблица 3

**Уровни и интервалы варьирования факторов при нахождении оптимального состава наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения**

Входные факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	Кодовые ( $X_i$ )			
	-1	0	+1	
	Натуральные			
Диоксид кремния ( $x_1$ )	4	7	10	3
Графит ( $x_2$ )	10	15	20	5
Дисульфид молибдена ( $x_3$ )	1	5	9	4

Рис. 3. Схематическое представление плана полного факторного эксперимента  $3^3$ 

Условия проведения экспериментов записываются в виде таблицы. Строки её соответствуют различным опытам, столбцы – значениям факторов в натуральном и кодированном виде. Такие таблицы называются матрицами планирования эксперимента (МПЭ). МПЭ, составленная для нашего случая, приведена в табл. 4.

Таблица 4

Матрица планирования полнофакторного эксперимента 3<sup>3</sup>

№ опыта/ образца	Натуральные значения входных факторов			Кодовые значения входных факторов		
	SiO <sub>2</sub> , %	C, %	MoS <sub>2</sub> , %	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	4	10	1	-1	-1	-1
2	4	10	5	-1	-1	0
3	4	10	9	-1	-1	+1
4	4	15	1	-1	0	-1
5	4	15	5	-1	0	0
6	4	15	9	-1	0	+1
7	4	20	1	-1	+1	-1
8	4	20	5	-1	+1	0
9	4	20	9	-1	+1	+1
10	7	10	1	0	-1	-1
11	7	10	5	0	-1	0
12	7	10	9	0	-1	+1
13	7	15	1	0	0	-1
14	7	15	5	0	0	0
15	7	15	9	0	0	+1
16	7	20	1	0	+1	-1
17	7	20	5	0	+1	0
18	7	20	9	0	+1	+1
19	10	10	1	+1	-1	-1
20	10	10	5	+1	-1	0
21	10	10	9	+1	-1	+1
22	10	15	1	+1	0	-1
23	10	15	5	+1	0	0
24	10	15	9	+1	0	+1
25	10	20	1	+1	+1	-1
26	10	20	5	+1	+1	0
27	10	20	9	+1	+1	+1

В соответствии с полученными результатами и составленной матрицей планирования полнофакторного эксперимента были изготовлены 27 опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения, отличающихся комбинацией концентраций компонентов.

Числовые значения выходного параметра оптимизации (ресурс работы смазочного материала), степень значимости влияния концентрации компонентов смазочного материала (независимых факторов) и оптимальный состав смазочного материала определим по результатам проведенных экспериментальных исследований.

### **Выводы**

Учитывая сложность проведения объемных натурных испытаний в условиях эксплуатации железнодорожного транспорта, невозможность оценки в этих условиях влияния некоторых факторов, а также значительное превышение стоимости эксплуатационных испытаний относительно лабораторных, было принято решение о проведении лабораторных исследований по сравнению трибологических характеристик, ресурса к истиранию и температурной стойкости опытных образцов наноструктурированного смазочного материала.

Для обеспечения идентичности основных выходных характеристик (вид износа и его интенсивность; коэффициент трения и его стабильность; трибологические характеристики, ресурс к истиранию смазочных материалов и т. д.) значениям на натурном объекте было проведено физико-математическое моделирование с применением теории подобия и метода анализа размерности. В результате чего были получены масштабные коэффициенты перехода от «натуры» к «модели», позволившие определить численные значения параметров, необходимых для проведения лабораторных исследований.

В процессе исследований было определено, что применяемые до настоящего времени методы определения трибологических характеристик смазочных материалов были разработаны для жидких и пластичных смазочных материалов. Данные методы не учитывали особенности и специфику свойств твердых и твердопластичных смазочных материалов-покрытий (в частности, разрабатываемого наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения) и, соответственно, не предоставляли возможности оценить эффективность применения смазочных материалов данного класса.

### Список литературы

1 Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов, П. Н. Щербак, В. М. Богданов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 3. – С. 177–182. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182.

2 **Майба, И. А.** Особенности механизма взаимодействия системы «ребень колеса – боковая грань рельса» в кривой пути / И. А. Майба, Д. В. Глазунов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 6. – С. 14–18. – ISSN 1819-2092.

3 **Харламов, П. В.** Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_122.

4 **Патент РФ № RU 2750585 C1.** Способ модифицирования систем термоплакирования стальных поверхностей трения / В. В. Шаповалов, В. Б. Мишиненко, П. В. Харламов [и др.] ; В61К 3/02, № 2020134704, заявл. 21.10.2020 ; опубл. 29.06.2021.

5 **Kolesnikov, V. I.** Friction, Wear, and Monitoring of Heavily Loaded Tribosystems : An Innovative Approach to Studying the Processes / V. I. Kolesnikov, A. L. Ozyabkin, E. S. Novikov // Journal of Friction and Wear, 2019. – P. 292–302. – DOI 10.3103/S1068366619040056.

6 **Майба, И. А.** Моделирование поведения смазочных материалов при граничном трении методом молекулярной динамики / И. А. Майба, Е. И. Никитин, М. И. Никитина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (74). – С. 29–36. – ISSN 0201-727X.

7 **Хуссеин Хайдар, А.** Твердые композиционные присадки на основе металлизированного графита для пластичных смазочных материалов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.04 / А. Хуссеин Хайдар ; Институт проблем машиноведения РАН. – Иваново, 2009. – 156 с.

8 **Dumitriu, M.** Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspec-

### References

1 Improving the efficiency of the "wheel-rail" friction system / V. V. Shapovalov, P. N. Shcherbak, V. M. Bogdanov [et al.] / The Russian Railway Science Journal. – 2019. – Vol. 78, No. 3. – P. 177–182. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182.

2 **Maiba, I. A.** Features of the mechanism of mutual action of the system "wheel crest – side edge of the rail" in the curved path / I. A. Maiba, D. V. Glazunov // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2015. – No. 6. – P. 14–18. – ISSN 1819-2092.

3 **Kharlamov, P. V.** Monitoring changes in elastic-dissipative characteristics for solving problems in the study of tribological processes in the "railway track – rolling stock" system / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_122.

4 **Russian Federation Patent No. RU 2750585 C1.** Method for modifying thermal cladding systems for steel friction surfaces / V. V. Shapovalov, V. B. Mishinenko, P. V. Kharlamov [et al.] ; В61К 3/02, No. 2020134704, declared on 21.10.2020 ; published on 29.06.2021.

5 **Kolesnikov, V. I.** Friction, Wear, and Monitoring of Heavily Loaded Tribosystems : An Innovative Approach to Studying the Processes / V. I. Kolesnikov, A. L. Ozyabkin, E. S. Novikov // Journal of Friction and Wear, 2019. – P. 292–302. – DOI 10.3103/S1068366619040056.

6 **Maiba, I. A.** Modeling the behavior of lubricants under boundary friction using the molecular dynamics method / I. A. Maiba, E. I. Nikitin, M. I. Nikitina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2019. – No. 2 (74). – P. 29–36. – ISSN 0201-727X.

7 **Hussein Haidar, A.** Solid composite additives based on metallized graphite for plastic lubricants : dissertation for the degree of Technical Sciences : 05.02.04 / A. Hussein Haidar ; Institute of Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences. – Ivanovo, 2009. – 156 p.

8 **Dumitriu, M.** Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspective / M. Dumitriu // Applied Mechanics and

tive / M. Dumitriu // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 371. – P. 647–651. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.647.

9 **Евдокимов, Ю. А.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – Москва : Наука, 1980. – 228 с.

10 Программа и методики исследования свойств модифицированного покрытия поверхности трибоконтакта ПП.0203.001-ПМ, ФГБОУ ВО РГУПС, утверждена 24.12.2018. – Ростов-на-Дону, 2018. – 20 с.

11 **Wolter, K. U.** Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process / K. U. Wolter, M. Zacher, B. Slovak // In : 9th World Congress on Railway Research, May 22–26, 2011.

Materials. – 2013. – Vol. 371. – P. 647–651. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.647.

9 **Evdokimov, Yu. A.** Planning and analysis of experiments in solving friction and wear problems / Yu. A. Evdokimov, V. I. Kolesnikov, A. I. Teterin. – Moscow : Nauka, 1980. – 228 p.

10 Program and methods for studying the properties of a modified tribocontact surface coating PP.0203.001-PM, FSBEI of HE RSTU, approved 24.12.2018. – Rostov-on-Don, 2018. – 20 p.

11 **Wolter, K. U.** Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process / K. U. Wolter, M. Zacher, B. Slovak // In : 9th World Congress on Railway Research, May 22–26, 2011.

*N. V. Zinoviev, P. V. Kharlamov*

### DETERMINING THE COMPONENTS OF A NANOSTRUCTURED LUBRICANT FOR OPEN HEAVY-LOADED FRICTION UNITS

**Abstract.** The paper presents a version of the structure of lubricant for open heavy-loaded friction units. A planning matrix of a full-factor experiment is also presented, taking into account combinations of component concentrations. Considering the specific nature of open, dynamically loaded friction pairs, it has been established that the use of a solid-plastic lubricant is most effective for these tribosystems. According to the proposed approach, lubricant development should focus on improving the structure and secondary properties of new lubricant compositions. Since the structure of a lubricant is primarily determined by the structure and complex of mechanical, chemical, and thermal properties of the three-dimensional framework formed by the thickener within the lubricant layer and the two-dimensional porous supporting layer associated with the framework on the friction surface.

**Keywords:** lubricant, structure, thickener, component concentration, friction surface, lubricant formulation.

**For citation:** Zinoviev, N. V. Determining the components of a nanostructured lubricant for open heavy-loaded friction units / N. V. Zinoviev, P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 205–213. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_205.

#### Сведения об авторах

**Зиновьев Никита Владимирович**  
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Проектирование и технология производства машин»,  
соискатель,  
e-mail: ptpm@rgups.ru

**Харламов Павел Викторович**  
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Проектирование и технология производства машин»,  
доктор технических наук, доцент,  
e-mail: kcharlamov@yandex.ru

#### Information about the authors

**Zinoviev Nikita Vladimirovich**  
Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Design and technology of production of machines”,  
Postgraduate,  
e-mail: ptpm@rgups.ru

**Kharlamov Pavel Viktorovich**  
Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Design and technology of production of machines”,  
Doctor of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: kcharlamov@yandex.ru