

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МОДИФИКАТОРА ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ
КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФРИКЦИОННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»****Поморцев В. А. ORCID ID 0009-0007-8012-2081,
Чистова Н. Г. ORCID ID 0009-0003-9158-408X,
Боловцов Б. А. ORCID ID 0009-0008-7500-976X,
Нестеренко Р. П. ORCID ID 0009-0005-5696-0435***Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»,
Красноярск, Российская Федерация, e-mail: pomortsev_va_rcir@mail.ru*

Обеспечение стабильного коэффициента сцепления в условиях неблагоприятных факторов окружающей среды остается критической проблемой эксплуатации железнодорожного транспорта, поскольку традиционные абразивные материалы вызывают повышенный износ трущихся поверхностей. Целью исследования является теоретическое и экспериментальное обоснование применения природного слоистого минерала, подвергнутого специальной обработке, для оптимизации фрикционного взаимодействия и снижения интенсивности изнашивания рельсовой стали. В работе использованы методы математического моделирования фрикционных процессов, стендовые испытания на машине трения с моделированием контактных нагрузок. Изучено влияние различных фракций минерального наполнителя, прошедшего механическую и термическую активацию, на трибологические показатели в сравнении с традиционным кварцевым материалом. Установлено, что механизм фрикционного взаимодействия кардинально отличается от абразивного микропорознения и базируется на формировании защитной пленки за счет пластического выдавливания и адгезии чешуйчатых частиц. Определено, что использование оптимальной мелкодисперсной фракции обеспечивает минимальную площадь пятна контакта и стабильное сохранение сцепления в условиях увлажнения благодаря гидрофобным свойствам дегидратированного минерала. Показано, что укрупнение частиц приводит к нежелательному переходу в режим абразивного изнашивания, нивелирующему преимущества слоистой структуры. Сделан вывод о высокой эффективности разработанного импортозамещающего модификатора, позволяющего продлить ресурс элементов инфраструктуры и подвижного состава при сохранении тяговых свойств локомотивов.

Ключевые слова: коэффициент сцепления, модификатор трения, кварцевый песок, износ рельсов, система «колесо – рельс», трибологические испытания**RESEARCH OF THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS
OF A FRICTION MODIFIER BASED ON MINERAL
COMPONENTS TO OPTIMIZE THE FRICTION INTERACTION
OF THE WHEEL-RAIL SYSTEM****Pomortsev V. A. ORCID ID 0009-0007-8012-2081,
Chistova N. G. ORCID ID 0009-0003-9158-408X,
Bolovtsov B. A. ORCID ID 0009-0008-7500-976X,
Nesterenko R. P. ORCID ID 0009-0005-5696-0435***Krasnoyarsk Rail Transport Institute a branch of the Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education «Irkutsk State Transport University»,
Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: pomortsev_va_rcir@mail.ru*

Ensuring a stable coefficient of adhesion in the face of adverse environmental factors remains a critical problem in the operation of railway transport, since traditional abrasive materials cause increased wear on rubbing surfaces. The aim of the study is to theoretically and experimentally substantiate the use of a natural layered mineral subjected to special treatment to optimize frictional interaction and reduce the wear rate of rail steel. The paper uses methods of mathematical modeling of friction processes, bench tests on a friction machine with modeling of contact loads. The effect of various fractions of mineral filler that have undergone mechanical and thermal activation on tribological parameters in comparison with traditional quartz material has been studied. It is established that the mechanism of frictional interaction is fundamentally different from abrasive micro-cutting and is based on the formation of a protective film due to plastic extrusion and adhesion of scaly particles. It is determined that the use of an optimal fine-dispersed fraction ensures a minimum contact spot area and stable adhesion under humid conditions due to the hydrophobic properties of the dehydrated mineral. It is shown that particle enlargement leads to an undesirable transition to the mode of abrasive wear, which negates the advantages of the layered structure. The conclusion is made about the high efficiency of the developed import-substituting modifier, which makes it possible to extend the life of infrastructure elements and rolling stock while maintaining the traction properties of locomotives.

Keywords: coefficient of adhesion, friction modifier, quartz sand, wear of rails, tribological tests, wheel-rail system

Введение

Обеспечение надёжного сцепления колёс локомотивов с рельсами является одним из ключевых условий безопасной и эффективной эксплуатации железнодорожного транспорта. Коэффициент сцепления, определяющий предельную величину реализуемой силы тяги и торможения, подвержен значительным колебаниям под влиянием внешних факторов. К числу наиболее неблагоприятных условий относятся повышенная влажность, осадки в виде дождя и снега, образование конденсата, листопад и гололёд. В этих условиях коэффициент сцепления может снижаться до 0,15, что приводит к буксованию колёсных пар, увеличению износа колёс подвижного состава и пути, а также к задержкам поездов и снижению пропускной способности участков [1-3].

Традиционным и наиболее распространённым средством повышения сцепления является подача кварцевого песка в зону контакта через пневматическую систему пескоподдачи [4]. Однако этот метод обладает фундаментальными недостатками. При повышенной влажности песок теряет сыпучесть, и в этом случае затрудняется его подача через штатные системы пескоподдачи, а его абразивное действие приводит к ускоренному износу бандажей и рельсов [5-7]. По статистическим данным Красноярской железной дороги, ежегодно выполняется более 4 тыс. обточек колёсных пар и заменяется до 120 км рельсов. Импортные синтетические модификаторы трения требуют модернизации подвижного состава, имеют высокую стоимость и подвержены санкционным рискам.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является создание нового импортозамещающего модификатора трения для оптимизации коэффициента сцепления при уменьшении износа трущихся поверхностей. В качестве перспективного решения предлагается использование модификатора трения на основе специально подготовленных (активирование) механотермическим способом природных слоистых минералов, в частности вермикулита. Вермикулит представляет собой минерал из группы гидрослюд, обладающий уникальной чешуйчатой (слоистой) структурой [8]. Принцип действия заключается не в абразивном микрорезании (как у кварцевого песка), а в создании адгезионного взаимодействия чешуйчатых частиц с микронеровностями металлических поверхностей под действием высоких контактных давлений. Кроме того, вермикулит обладает гидрофобными свойствами, что позволяет сохранять эффективность во влажной среде.

Цель настоящего исследования – теоретически и экспериментально обосновать применение активированного вермикулита в качестве модификатора трения для оптимизации сцепления в системе «колесо – рельс» и оценить его влияние на интенсивность износа рельсовой стали.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. анализ существующих методов повышения сцепления в системе «колесо – рельс» и выявление их недостатков;
2. теоретическое обоснование применения механотермически активированного вермикулита в качестве модификатора трения для трибосистемы «колесо – рельс»;
3. экспериментальное исследование трибологических характеристик разработанного модификатора в сравнении с кварцевым песком;
4. оценка влияния фракционного состава вермикулита на интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей;
5. статистическая обработка экспериментальных данных и формулирование рекомендаций по практическому применению.

Проблема сцепления колёс с рельсами имеет многолетнюю историю исследований, восходящую к середине XIX века. В отечественной науке эта проблема систематически изучалась в трудах ВНИИЖТ, а начиная с 1980-х годов – в работах И. А. Майба, Г. В. Самме, Ю. М. Лужнова, И. Г. Горячевой, С. М. Захарова и других [6; 9; 10]. В работе [9] представлены результаты трибологических исследований по разработке модификаторов трения в системе «колесо – рельс», выполненные с использованием лабораторных установок трения.

В обзоре Чена с соавторами выполнен анализ современных экспериментальных и теоретических исследований характеристик сцепления при наличии различных материалов третьего тела в трибоконтакте [11]. Авторами показано, что коэффициент сцепления зависит от ряда внешних факторов (климатические особенности, загрязнения, осадки и т. д.). В работе [12] приведены количественные значения коэффициента трения: для чистого сухого рельса он составляет 0,25–0,30, для рельса с песком – 0,25–0,33, для чистого мокрого рельса – 0,18–0,20, для мокрого рельса с песком – 0,22–0,25, для мокрых листьев – 0,07. В работе [13] рассмотрены адгезионные характеристики контакта «колесо – рельс» в сухих и влажных условиях, а также влияние песка на рельсы, покрытые листвой.

В работе [14] экспериментально исследовали влияние расхода песка на коэффициент трения. Авторами установлено,

что влажность и загрязнение поверхности рельса неблагоприятно влияют на передачу тяговых усилий [14]. В работе [15] показано, что эффективность улавливания частиц песка в зоне контакта «колесо – рельс» составляет менее 20%, что указывает на низкую эффективность традиционных систем пескоподдачи.

Эффективность кварцевого песка как модификатора трения в системе «колесо – рельс» обусловлена тремя основными факторами [4; 6; 16]. Во-первых, песок разрушает адсорбционные и окисные плёнки на поверхностях, обнажая кристаллы металла и способствуя увеличению сил адгезии. Во-вторых, зёрна песка вдавливаются в контактирующие поверхности, увеличивая объём металла, участвующего в сопротивлении сдвигу. В-третьих, песок заполняет пустоты между микровыступами, вытесняя частицы адсорбата – явление, получившее в литературе название «сплошности».

Физический механизм можно выразить через параметры контакта. Площадь фактического контакта

$$A_{\phi} = n \cdot \pi \cdot r^2, \quad (1)$$

где n – число частиц песка в зоне контакта; r – средний радиус контакта частицы.

Вследствие явления сплошности A_{ϕ} возрастает, что приводит к увеличению сил адгезии. Сопротивление сдвигу

$$\tau_{\text{сд}} = F_{\text{тр}} / A_{\phi}$$

возрастает при наличии частиц, имеющих высокое собственное сопротивление сдвигу.

В работе Ариас-Куэваса и Ли показано, что песок при определённых условиях может действовать как твёрдая смазка, снижая коэффициент трения в сухом контакте [17]. Авторами установлено, что использование частиц меньшего размера и более высокого расхода подачи усиливает смазывающий эффект [17]. Кроме того, эффективность подачи песка составляет менее 20% [15; 18].

В работе Аракеляна и соавторов предложена альтернатива кварцевому песку – подача в зону контакта частиц окалины или магнетита [19]. Установлено, что эти материалы обеспечивают требуемый коэффициент сцепления при меньшем износе поверхностей по сравнению с песком [19].

В отличие от абразивного действия кварцевого песка вермикулит, как слоистый силикат, способен создавать адгезионное взаимодействие с металлическими поверхностями [20]. В работе [21] изучены физико-химические свойства и минералогическая характеристика вермикулита: кристаллическая структура, морфология частиц, термическая устойчивость и сорбционные

свойства. Установлено, что вермикулит обладает слоистой структурой, способностью к гидратации-дегидратации и высокой удельной поверхностью [21].

В работах [22; 23] исследованы процессы механохимической активации вермикулита. В работе [23] определено, что в результате механохимического воздействия на слоистые структуры вермикулита протекают процессы, связанные с диспергированием, расслоением слоистого пакета и дегидратацией, приводящей к формированию однослойных или двухслойных гидратных состояний. Количество гидратной воды изменяется в зависимости от количества подведённой энергии, а от количества гидратных слоёв напрямую зависят сорбционные характеристики вермикулита. Наиболее значимый эффект достигается при обработке вермикулита в течение 10 минут в ролико-кольцевой вибромельнице и характеризуется нулевым гидратным состоянием минерала [23].

В работе [24] показано, что триботехнические материалы на основе вермикулита обладают минимальной величиной модуля упругости и большим значением величины упругого восстановления покрытия, что способствует снижению износа сопряжённых поверхностей. Сочетание этих эффектов создаёт частицы с высокой адгезионной активностью и гидрофобными свойствами.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе вермикулитовые компоненты как база для модификатора трения подготавливались механотермическим способом активации. Первоначально вермикулит (Татарское месторождение, Красноярский край) подвергался механическому диспергированию в механической мельнице с торцевым зацеплением по типу улитки Паскаля (частота колебаний 25 Гц, амплитуда 3 мм) в течение 15 минут. Данный режим обеспечивает нулевое гидратное состояние минерала. Далее проводилась термическая обработка при температуре 900 °С в муфельной печи (Nabertherm L1/12) с выдержкой 60 минут и последующим охлаждением на воздухе. Термическая обработка при указанной температуре приводит к образованию энстатита и более чем двукратному возрастанию адсорбционного сродства материала. После этого подготовленный материал фракционировался при помощи высокоточных сит (аналитический ситовой анализатор AS 200) с получением фракций 0,2–0,5, 0,4–1,0 и 1,0–2,0 мм. В результате механотермической активации вермикулита достигаются требуемые трибологические характеристики разрабатываемого модификатора трения.

Качественный контроль фазового состава и морфологии частиц на промежуточных этапах выполнялся с использованием методов рентгенофазового анализа (XRD) на дифрактометре LAN Scintific XDT600 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) в интервале углов $2\theta = 5\text{--}70^\circ$. Установлено, что после термической обработки при 900°C в структуре вермикулита фиксируются рефлексы, соответствующие энстатиту (MgSiO_3), что согласуется с данными [21]. Интенсивность рефлексов слоистой структуры снижается, что свидетельствует о дегидратации и частичной деструкции слоистого пакета.

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR) выполнялась на спектрометре Thermo Nicolet 6700 (диапазон $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$, таблетирование с KBr). В спектре исходного вермикулита присутствуют полосы при 3620 см^{-1} (валентные колебания O-H), 1640 см^{-1} (деформационные колебания H-O-H), 1020 см^{-1} (валентные колебания Si-O). После термической активации интенсивность полос при 3620 и 1640 см^{-1} существенно снижается, что подтверждает дегидратацию.

Гранулометрический состав контролировался методом лазерной дифракции на анализаторе Malvern Mastersizer 3000. Для фракции $0,2\text{--}0,5 \text{ мм}$ средний размер частиц $d_{50} = 0,32 \text{ мм}$, $d_{10} = 0,22 \text{ мм}$, $d_{90} = 0,48 \text{ мм}$.

Краевой угол смачивания измерялся методом сидячей капли (анализатор KRÜSS DSA30). Для активированного вермикулита краевой угол смачивания составил 112° , что подтверждает его гидрофобные свойства (для исходного вермикулита – 78°).

Несмотря на проведенный комплекс исследований, для подтверждения структурных и фазовых превращений, происходящих в процессе механотермической активации вермикулита, необходим систематический анализ данных по фазовым превращениям, термической стабильности (TGA/DSC), сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS). Такой анализ требует отдельного углубленного исследования и не включён в настоящую работу, поскольку его объём выходит за рамки поставленных задач.

Теоретические и экспериментальные данные

Коэффициент сцепления ψ определяется отношением силы сцепления $F_{\text{сц}}$ к вертикальной нагрузке от колеса на рельс P [1]:

$$\psi = F_{\text{сц}} / P. \quad (2)$$

Коэффициент трения скольжения μ определяется аналогично:

$$\mu = F_{\text{тр}} / P, \quad (3)$$

Для практических расчётов тяговых свойств локомотивов в «Правилах тяговых расчётов для поездной работы» (ПТР) используется эмпирическая зависимость для расчётного коэффициента сцепления [25]:

$$\psi_k = (0,118 + 5) / (27,5 + v), \quad (4)$$

где v – скорость движения, км/ч.

Для прогнозирования коэффициента сцепления при использовании вермикулита предложена зависимость, учитывающая базовый уровень сцепления на сухих рельсах, влажностные потери и влияние фракционного состава:

$$\psi_{\text{верм}} = \psi_{\text{сух}} \cdot k_{\text{вл}} \cdot k_{\text{фр}}, \quad (5)$$

где $\psi_{\text{сух}}$ – базовый коэффициент сцепления для сухих рельсов (принимается $0,32\text{--}0,35$); $k_{\text{вл}}$ – коэффициент сохранения фрикционных свойств при увлажнении (для вермикулита $k_{\text{вл}} = 0,85\text{--}0,90$); $k_{\text{фр}}$ – коэффициент, учитывающий фракционный состав (для оптимальной фракции $0,2\text{--}0,5 \text{ мм}$ $k_{\text{фр}} = 1,0$).

Для кварцевого песка аналогичная зависимость имеет вид:

$$\psi_{\text{песок}} = \psi_{\text{сух}} \cdot k_{\text{вл.песок}} \cdot k_{\text{фр.песок}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{вл.песок}}$ – коэффициент сохранения фрикционных свойств песка при увлажнении, составляющий, по данным [4; 5], $0,55\text{--}0,65$.

По вышеприведенным формулам определены значения коэффициентов сцепления при разных состояниях трибоконтакта (сухой, увлажненный). В расчетах принято допущение – коэффициент трения приблизительно равен коэффициенту сцепления. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Кварцевый песок обеспечивает приемлемый уровень сцепления только на сухих рельсах, а при увлажнении его эффективность снижается более чем в два раза. Модификатор трения на основе активированного вермикулита, напротив, демонстрирует стабильность фрикционных свойств во влажной среде.

С целью верификации расчетных данных авторами проведены лабораторные испытания. Испытания проводились на установке трения ТС-1, оснащённой системой контроля нагрузки и скорости относительного скольжения, а также устройством для дозированной подачи модификатора трения [5]. В качестве вращающего элемента использовался диск диаметром 100 мм , выточенный из колеса локомотива, а в качестве контртела использовалась рельсовая сталь М76 по ГОСТ 24182-80 [4]. Исследовались кварцевый песок фракции $0,5\text{--}1,0 \text{ мм}$ и образцы модификатора трения на основе активированного вермикулита трёх фракций: $0,2\text{--}0,5$; $0,4\text{--}1,0$; $1,0\text{--}2,0 \text{ мм}$.

Таблица 1

Расчётные значения коэффициента сцепления для сухого и увлажнённого контакта

Материал	Состояние контакта	Расчетный коэффициент сцепления
Кварцевый песок	Сухое	0,28–0,30
Модификатор трения (активированный вермикулит, фр. 0,2–0,5 мм)	Сухое	0,28–0,32
Кварцевый песок	Увлажнённое	0,11–0,13
Модификатор трения (активированный вермикулит, фр. 0,2–0,5 мм)	Увлажнённое	0,25–0,30

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Экспериментальные значения износа

№	Образец	Фракция, мм	$\bar{x}$, мм ²	σ , мм ²	Доверительный интервал 95%	CV, %	p-value (относительно эталона)
1	Кварцевый песок (эталон)	0,5–1,0	0,56	0,042	[0,530; 0,590]	7,5	-
2	Вермикулит	0,2–0,5	0,12	0,015	[0,109; 0,131]	12,5	< 0,001
3	Вермикулит	0,4–1,0	0,30	0,028	[0,280; 0,320]	9,3	< 0,001
4	Вермикулит	1,0–2,0	1,20	0,095	[1,132; 1,268]	7,9	< 0,001

Примечание: составлено авторами на основе экспериментальных данных.

Для создания условий повышенной влажности на поверхность трения перед каждым испытанием наносилась вода в объёме 0,5 мл с помощью пипетки, что обеспечивало равномерное распределение водной плёнки по площади контакта. Толщина водной плёнки, рассчитанная исходя из объёма и площади пятна контакта, составляла приблизительно 50–80 мкм.

При проведении испытаний устанавливались следующие параметры: нормальная нагрузка – 500 Н; скорость относительного скольжения – 0,5 м/с; продолжительность – 60 с; интенсивность подачи – 2 г/мин. После проведения каждого испытания измерялись линейные размеры пятна износа, вычислялась площадь износа (мм²), фиксировался коэффициент трения – с погрешностью не более 5%. После очищения поверхности сопряжения проводился микроскопический анализ поверхности трения при увеличении 100–500 крат. С каждым образцом модификатора трения, а также с эталоном (кварцевый песок) проводились по 10 повторений.

Для каждой серии испытаний ($n = 10$) рассчитывались среднее арифметическое значение $\bar{x}$, стандартное отклонение σ и доверительный интервал при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (95% доверительная вероятность). Проверка нормальности рас-

пределения выполнялась по критерию Шапиро – Уилка. Сравнение средних значений для разных модификаторов проводилось с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Усредненные результаты экспериментальных данных по определению износа контактирующих поверхностей представлены в таблице 2.

Анализ данных (табл. 2) показывает:

1. образец № 2 (вермикулит, фракция 0,2–0,5 мм) демонстрирует минимальную среднюю площадь износа (0,12 мм²), что в 4,7 раза ниже эталонного значения для кварцевого песка (0,56 мм²). Стандартное отклонение ($\sigma = 0,015$ мм²) и доверительный интервал [0,109; 0,131] мм² свидетельствуют о высокой воспроизводимости результатов. Коэффициент вариации ($CV = 12,5\%$) подтверждает стабильность трибологических характеристик данного образца;

2. образец № 3 (вермикулит, фракция 0,4–1,0 мм) занимает промежуточное положение: площадь износа составляет 0,30 мм² ($\sigma = 0,028$ мм²), что в 1,87 раза ниже эталона. Доверительный интервал [0,280; 0,320] мм² не перекрывается с интервалом эталона, что указывает на статистически значимое различие;

Таблица 3

Экспериментальные значения коэффициента трения

№	Образец	Фракция, мм	Условия	$\bar{\mu}$	σ	Доверительный интервал 95%	p-value (относительно эталона)
1	Кварцевый песок (эталон)	0,5–1,0	Сухое	0,35	0,018	[0,337; 0,363]	-
			Влажное	0,18	0,015	[0,169; 0,191]	-
2	Вермикулит	0,2–0,5	Сухое	0,32	0,016	[0,309; 0,331]	0,0009
			Влажное	0,25	0,014	[0,240; 0,260]	< 0,001
3	Вермикулит	0,4–1,0	Сухое	0,34	0,017	[0,328; 0,352]	0,217
			Влажное	0,24	0,016	[0,229; 0,251]	< 0,001
4	Вермикулит	1,0–2,0	Сухое	0,33	0,019	[0,316; 0,344]	0,026
			Влажное	0,21	0,018	[0,197; 0,223]	< 0,01

Примечание: составлено авторами на основе экспериментальных данных.

3. образец № 4 (вермикулит, фракция 1,0–2,0 мм) демонстрирует наибольшую площадь износа (1,20 мм²), что превышает эталонное значение в 2,14 раза. Данный результат указывает на переход к абразивному режиму трения при укрупнении частиц, что делает крупные фракции вермикулита непригодными для практического применения в железнодорожной отрасли.

Проверка статистической значимости различий между образцами вермикулита и эталоном выполнена с использованием двухвыборочного *t*-критерия Стьюдента для независимых выборок. Предварительная проверка равенства дисперсий по критерию Левена показала их однородность ($p > 0,05$), что позволило использовать *t*-тест с объединённой оценкой дисперсии.

Усредненные результаты экспериментальных данных по определению коэффициента трения представлены в таблице 3.

Коэффициент трения измерялся в двух режимах: сухой контакт и влажный контакт (водная плёнка 50–80 мкм, относительная влажность 85–90%). Во всех исследованных группах коэффициент вариации не превышает 8,5%, а доверительные интервалы узки, что подтверждает высокую воспроизводимость результатов.

В сухих условиях значения коэффициента трения для вермикулитовых образцов близки к эталонному песку. Для одних фракций различия статистически не значимы ($p > 0,05$), для других – значимы ($p < 0,05$), однако абсолютное снижение не превышает 8,6%. Это означает, что в сухом контакте замена песка на вермикулит не приводит к критическому снижению сцепления, достаточному для нарушения реализации силы тяги.

В условиях увлажнения все исследованные фракции вермикулита демонстрируют

статистически значимое преимущество перед песком ($p < 0,001$ для мелких и средних фракций; $p < 0,01$ для крупной). Максимальное повышение коэффициента трения относительно песка (на 38,9%) зафиксировано для фракции 0,2–0,5 мм. Данный эффект обусловлен гидрофобностью активированного вермикулита (краевой угол смачивания 112°), позволяющей вытеснять водную плёнку из зоны контакта и сохранять трение на поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительный анализ теоретических расчётов (табл. 1) и данных, полученных в ходе стендовых испытаний на машине трения ТС-1 (табл. 2 и 3), демонстрирует высокую степень корреляции предложенных эмпирических зависимостей с фактическими трибологическими характеристиками трибосопряжения «колесо – рельс».

Ключевым эксплуатационным недостатком традиционной системы пескоподдачи является существенное снижение коэффициента сцепления в условиях увлажнения. Как показали лабораторные испытания, при наличии водной плёнки в контакте коэффициент трения кварцевого песка снижается с 0,35 до 0,18 (падение на 48,5%). Это обусловлено тем, что гидрофильные частицы кварца не способны вытеснить адсорбированную влагу из зоны контакта, а при высоких скоростях скольжения водная плёнка выступает в роли гидродинамической смазки. В отличие от него модификатор трения (образец № 2) на основе активированного вермикулита (фракция 0,2–0,5 мм) сохраняет стабильно высокий коэффициент трения во влажной среде на уровне 0,25. Данный эффект объясняется гидрофобными свойствами используемых минералов, прошед-

ших термическую дегидратацию (краевой угол смачивания 112°), а также способностью чешуйчатых частиц внедряться в микронеровности рельсовой стали М76, обеспечивая механическое зацепление и адгезионное взаимодействие даже при наличии промежуточного слоя жидкости.

Особого внимания заслуживает влияние фракционного состава вермикулита на интенсивность изнашивания контртела. Переход от фракции 0,2–0,5 мм к более крупной фракции 1,0–2,0 мм приводит к смене механизма трения. Если мелкодисперсный активированный вермикулит обеспечивает площадь износа 0,12 мм² (что в 4,7 раза ниже показателя кварцевого песка – 0,56 мм²), то укрупнение частиц до 1,0–2,0 мм вызывает резкий рост износа до 1,20 мм² (превышение эталонного значения в 2,1 раза).

Оптимальная фракция 0,2–0,5 мм реализует принципиально иной, адгезионно-пластический механизм защиты трибоконтакта. Под действием высоких контактных давлений (моделирующих нагрузку от колесной пары) слоистые пакеты вермикулита эксфолируются, образуя на поверхности катания трибоплёнку с низким модулем сдвига и высоким значением упругого восстановления. Данная плёнка предотвращает прямой контакт «металл – металл», исключая образование ювенильных площадок и последующее схватывание (адгезионное вырывание материала), которое является основной причиной волнообразного износа рельсов и ползунов на колёсах.

Выводы

Проведённое исследование направлено на решение актуальной научно-технической задачи по созданию импортозамещающего модификатора трения для системы «колесо – рельс», лишённого недостатков традиционного кварцевого песка и нестабильных полимерных композиций. На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

– в условиях стендовых испытаний показано, что механотермическая активация вермикулита приводит к формированию частиц с нулевым гидратным состоянием, обладающих выраженной гидрофобностью (краевой угол смачивания 112°) и высокой адгезионной способностью. В отличие от абразивного микрорезания, характерного для песка, активированный вермикулит формирует в зоне контакта защитную трибоплёнку, работающую предположительно по механизму пластического выдавливания и адгезии;

– установлено, что наилучшие трибологические характеристики в условиях

стендового испытания демонстрирует модификатор на основе вермикулита фракции 0,2–0,5 мм. Его применение обеспечивает снижение площади износа рельсовой стали М76 в 4,7 раза (с 0,56 до 0,12 мм²) по сравнению с кварцевым песком при сохранении высокого коэффициента сцепления в сухих условиях (0,32). Статистическая обработка данных (10 повторений) подтверждает достоверность результатов;

– экспериментально верифицировано, что во влажной среде (водная плёнка толщиной 50–80 мкм, относительная влажность 85–90%) коэффициент трения вермикулитового модификатора остаётся на уровне, потенциально достаточном для реализации сил тяги и торможения (0,25), в то время как эффективность кварцевого песка снижается до значений (0,18), которые могут рассматриваться как критические;

– показано, что увеличение размера частиц вермикулита свыше 1,0 мм нивелирует преимущества его слоистой структуры и переводит процесс трения в режим абразивного изнашивания, что требует дополнительной проверки для оценки допустимости применения в железнодорожном транспорте.

Разработанный модификатор трения на основе отечественного минерального сырья в условиях лабораторного эксперимента демонстрирует характеристики, позволяющие рассматривать его как перспективный для дальнейших исследований. Для подтверждения эффективности в реальных условиях эксплуатации требуются полигонные испытания при качении с проскальзыванием, различных скоростях, нагрузках, температурах, а также в присутствии загрязнений (листья, масло, лёд) с проверкой подачи материала через реальные системы пескоподдачи.

В качестве направления дальнейших исследований предполагается проведение комплексного физико-химического анализа активированного вермикулита (XRD, TGA, DSC, FTIR, SEM-EDS) для установления количественных корреляций между структурными параметрами и трибологическими свойствами модификатора.

Список литературы

1. Майба И. А. Повышение эксплуатационной эффективности фрикционных систем железнодорожного подвижного состава : монография. Москва: Маршрут, 2005. 216 с. ISBN: 5-89035-203-2. EDN: SUOLER.
2. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колёсных пар локомотива с рельсами: монография. Москва: Маршрут, 2005. 80 с. ISBN: 5-89035-221-0. EDN: RYRPHJ.
3. Поморцев В. А., Орленко А. И., Лыткина Е. М. Оценка сдерживающих эксплуатационных факторов при развитии тяжеловесного движения на Восточном полиго-

не // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 1 (91). С. 60-65. EDN: JMADQS.

4. Чистова Н. Г., Поморцев В. А. Эффективность минеральных присадок в смазочных композициях для трибосопряжения «колесо-рельс» // Вестник машиностроения. 2026. Т. 105. № 3. С. 248-253. DOI: 10.36652/0042-4633-2026-105-3-248-253. EDN: GNZSIB.

5. Поморцев В. А., Чистова Н. Г. Теоретико-аналитическое исследование снижения износа в системе «колесо-рельс» при использовании новых типов смазок на основе минеральных веществ // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : Труды XXIX Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск. 2025. С. 213-217. EDN: KDG0AY.

6. Шаповалов В. В., Щербак П. Н., Богданов В. М., Фейзов Э. Э., Харламов П. В., Фейзова В. А. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78. № 3. С. 177-182. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182. EDN: ZZGAOL.

7. Патент РФ № 2721993 С1. Устройство активации трения и активатор повышенного трения: № 2019117405 : заявл. 04.06.2019; опубл. 25.05.2020, бюл. № 15 / Валинский О. С., Выщепан А. Л., Лубягов А. М., Майба И. А.; патентообладатели Валинский О. С., Выщепан А. Л., Лубягов А. М., Майба И. А.

8. Чистова Н. Г., Худов Д. А., Поморцев В. А. Получение смазочной композиции с улучшенными свойствами // Трансформация транспорта и образования: Труды Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск. 2024. С. 474-479. EDN: QHUCAY.

9. Захаров С. М., Горячева И. Г., Краснов А. П., Юдин А. С., Морозов А. В., Марков Д. П., Наумкин А. В., Овечкин А. В. Трибологические исследования для разработки модификаторов трения в системе «колесо – рельс» // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 6. С. 611-620. EDN: VINNPT.

10. Горячева И. Г., Захаров С. М., Краснов А. П., Юдин А. С., Торская Е. В., Марков Д. П., Жаров И. А. Оценка условий работы и требуемых свойств модификаторов трения для поверхности катания системы «колесо-рельс» // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 6. С. 547-554.

11. Chen H. Review of various influencing factors and improvement measures on wheel-rail adhesion // Wear. 2024. P. 205283. DOI: 10.1016/j.wear.2024.205283. EDN: QRBGPW.

12. Bosso N., Gugliotta A., Soma A. Wheel-rail adhesion: A review // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 24. P. 680-691.

13. Bosso N., Gugliotta A., Magelli M., Oresta I. F., Zampieri N. Study of wheel-rail adhesion during braking maneuvers // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 24. P. 680-691. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.060.

14. Kölker M., Schindler C., Reich A. Analysis of the Influence of the Sanding Output Rate on the Coefficient of Friction // EuroBrake 2019. EB2019-FBR-025.

15. Maramizonouz S., Nadimi S., Skipper W. A. et al. Numerical modelling of particle entrainment in the wheel-rail interface // Computational Particle Mechanics. 2023. Vol. 10. № 6. P. 2009-2019. DOI: 10.1007/s40571-023-00603-z. EDN: WZUCPY.

16. Лужнов Ю. М. Сцепление колёс с рельсами (природа, закономерности, механизм реализации). Москва: Интекст, 2003. 144 с. ISBN: 5-89277-044-3.

17. Arias-Cuevas O., Li Z., Lewis R. Investigating the Lubricity and Electrical Insulation Caused by Sanding in Dry Wheel-Rail Contacts // Tribology Letters. 2010. Vol. 37. P. 623–635. DOI: 10.1007/s11249-009-9560-1.

18. Maramizonouz S., Nadimi S., Lewis R. CFD-DEM modelling of particle entrainment in wheel-rail interface: a parametric study on train characteristics // Acta Mechanica. 2024. DOI: 10.1007/s00707-024-04032-8. EDN: HDRSYC.

19. Sosnov I. I., Osenin Y. Y., Osenin Y. I. et al. Improvement of Adhesion of the Wheels of the Railway Carriage to the Rails by Means of Supply of the Scale and Magnetite Particles to the Contact Zone // Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. № 4. P. 330-334. DOI: 10.3103/S1068366618040165. EDN: YCAVZB.

20. Состояние рельсов и условия сцепления в системе колесо – рельс // Железные дороги мира. 2012. № 9. С. 67-70. EDN: PBRPWT.

21. Очилов С. У., Алланиязов Д. О., Каландарова Ф. К., Аймуратов Д. А., Аймуратова Н. К. Физико-химические свойства и минералогическая характеристика вермикулита тебинбулакского месторождения // Universum: технические науки. 2025. № 12 (141). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-svoystva-i-mineralogicheskaya-harakteristika-vermikulita-tebinbulakskogo-mestorozhdeniya> (дата обращения: 20.06.2026).

22. Marcos C., Reynes Ja. F., Álvarez-Lloret P. Mechanochemical Treatments of Commercial Vermiculites // Minerals. 2025. Vol. 15. № 4. P. 383. DOI: 10.3390/min15040383. EDN: HNNJLQ.

23. Севергина Е. С., Гордина Н. Е. Влияние механохимической активации на структуру и свойства поверхности вермикулита // Российский химический журнал. 2024. Т. 68. № 3. С. 47-53. DOI: 10.6060/rcj.2024683.8.

24. Леонтьев Л. Б., Леонтьев А. Л., Шапкин Н. П., Молоков К. А., Друзь И. Б. Методология проектирования износостойких органо-неорганических материалов для повышения долговечности трибосопряжения «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2 (63). С. 63-74. DOI: 10.24866/2227-6858/2025-2/63-74. EDN: UMKAUV.

25. Правила тяговых расчётов для поездной работы: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867 р. Москва: ОАО «РЖД», 2016. 515 с.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Финансирование осуществлялось Красноярским краевым фондом науки в рамках Конкурса прикладных научно-технических проектов по направлениям технологического лидерства, выполняемых молодежью и детьми (Конкурс МиД ККФН – 2026).

Financing: The financing was carried out: Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the Contest of Applied Scientific and Technical Projects in the Areas of Technological Leadership carried out by young people and children (MiD KKFNS Contest – 2026).