

## СНИЖЕНИЕ БОКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПУТЬ КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЛУБРИКАЦИИ РЕЛЬСОВ

Наведені результати практичного застосування технології комбінованої лубрикації рейок.

Приведены результаты практического применения технологии комбинированной лубрикации рельсов.

The results of practical application of the technology of combined rails lubrication are presented in the article.

В настоящее время исследования в области снижения бокового воздействия на путь подвижного состава остаются наиболее востребованными железнодорожным транспортом. Актуальность проблемы определяется безопасностью движения и большими эксплуатационными расходами, связанными с износом рельсов и колес подвижного состава, а также с высокими энергетическими затратами на преодоление фрикционного сопротивления в кривых, которые являются прямыми производными от бокового воздействия подвижного состава на путь.

Вопросы ресурсосбережения в связи с ростом цен на энергоносители, рельсы и колесные пары, трудозатраты на замену рельсов и переточку колес, а также в немалой степени безопасность движения приобретают особую остроту. Для решения, возникших в связи с этим вопросов, необходимы исследования в области снижения бокового воздействия на путь подвижного состава.

Одним из эффективных направлений в рамках комплексной программы по ресурсосбережению является разработка технологии комбинированной лубрикации рельсов.

Во ВНИКТИ проводилась работа по созданию комбинированной лубрикации рельсов. Для определения эффективности комбинированной лубрикации была разработана обобщенная математическая модель «экипаж – тяговый привод – путь». Модель описывается 78 нелинейными дифференциальными уравнениями с учетом нелинейностей упругодиссипативных характеристик.

Особенностями математической модели являются: учет нелинейностей упругодиссипативных характеристик, зазоров, преднатягов, фрикционных связей с сухим трением, учет забегания точки контакта гребня колеса и рельса; колесная пара рассматривается с упругой на

кручение осью; моделирование различных коэффициентов трения обоих рельсов по кругам катания и боковым поверхностям. Комплексно учитываются практически все имеющиеся на локомотиве нелинейные связи: трение в буксовых подшипниках, зазоры в шкворневом узле, в связях кузова с тележками, в зубчатом зацеплении, фрикционное демпфирование, сухое трение и преднатяг в подвеске тягового двигателя, силы упругого скольжения колес в зависимости от трибологического состояния рельсов.

Численное моделирование движения экипажа шестиосного тепловоза осуществлялось с помощью специализированного программного комплекса «Универсальный механизм». Программный комплекс позволяет получить различные показатели динамических качеств экипажа и выполнять их статистическую обработку. Имеется возможность в процессе работы программы визуализировать силы и моменты, действующие в элементах конструкции, в пространственном представлении.

Исследование взаимодействия грузового вагона и пути проводилось на математической модели, разработанной под руководством профессора Д. Ю. Погорелова (БГТУ) и д-ра техн. наук В. С. Коссова (ВНИКТИ).

Рассмотрены три варианта трибологического состояния системы «колесо–рельс». Моделировалось движение шестиосного локомотива в режиме выбега и тяги и движение четырехосного вагона в кривой  $R = 300$  м.

Вариант 1. Коэффициент трения скольжения в возможных точках контакта колесной пары с рельсами (рассматривается двухточечный контакт колеса с рельсом) одинаков и равен 0,3 (исходный вариант).

Вариант 2. Коэффициент трения скольжения в контакте между гребнем левого (по ходу движения) колеса с боковой поверхностью на-

ружного рельса равен 0,06 (смазывание гребня или рельса), в остальных точках контакта – 0,3.

Вариант 3. Коэффициент трения скольжения гребня левого колеса по боковой поверхности наружного рельса равен 0,06, на поверхности катания правого колеса по внутреннему рельсу равен 0,1, в остальных точках контакта – 0,3.

В результате проведенного компьютерного моделирования движения шестиосного тепловоза в кривой  $R = 300$  м получены следующие выводы:

1. Режим выбега, колеса конические.

Рамные силы во всех трех вариантах трибологического состояния практически не меняются, так как природа рамных сил связана с силами инерции обрессоренных масс. Наблюдается лишь их незначительный рост в варианте 2 – на 5...7 %. Боковые и направляющие силы также несколько возрастают в варианте 2 против исходного варианта (на 5 %), а при смазывании еще и поверхности катания внутреннего рельса (вариант 3) они снижаются в 1,5...2 раза, в зависимости от скорости движения, так как уменьшается поперечная составляющая сил трения внутреннего колеса.

2. Режим тяги, колеса конические.

Рамные силы, боковые силы, направляющие силы в режиме тяги сохраняют тенденцию изменения, как и в режиме выбега. Вариант 2 практически не изменяет эти показатели против варианта 1. А в варианте 3 боковые силы и направляющие силы снижаются в 4–5 раз при  $v = 30$  км/ч и в 1,3...1,5 раза при  $v = 70$  км/ч.

При смазывании боковой поверхности наружного рельса (вариант 2) значительно (в 3 раза) уменьшаются продольные силы трения на гребнях набегающих на этот рельс колес

и одновременно в 2 раза возрастают продольные силы крипа, набегающего колеса первой колесной пары, так как сила тяги в основном реализуется на поверхностях катания этого колеса.

Поперечные силы крипа на колесах движущихся по наружному рельсу изменяются незначительно до 9 %. При смазывании дополнительно поверхности катания внутреннего рельса (вариант 3) происходит в 2,5 раза суммарное по двум колесам уменьшение поперечных сил крипа на набегающей колесной паре, в 8 раз силы трения на гребне набегающего колеса. Одновременно происходит перераспределение продольных сил крипа, на первой колесной паре – увеличение продольных сил крипа на колесах, движущихся по наружному рельсу в 4 раза и уменьшение сил продольного крипа на колесах, движущихся по внутреннему рельсу в 1,5 раза.

Таким образом, появляется момент, отворачивающий колесные пары и тележку в целом от наружного рельса в кривой.

Смазывание поверхности катания внутреннего рельса по варианту 3 в 4 раза уменьшает момент сопротивления повороту тележки в кривой  $R = 300$  м по сравнению с вариантом 1.

Смазывание поверхности катания рельсов приводит к снижению коэффициента трения и сцепления колес с рельсами. Как это повлияет на тяговые качества локомотива? Определим силу тяги, реализуемую каждой колесной парой и локомотивом в целом для двух вариантов (1 и 3) трибологического состояния рельсов. Сила тяги каждой колесной пары определяется как сумма продольных сил крипа и силы трения на гребне набегающего на рельс колеса. Результаты этих расчетов при скорости 30 км/ч приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сила тяги по осям тепловоза, кН

Номер варианта	Колесная пара						Сила тяги на локомотив
	1	2	3	4	5	6	
1	35,4	36,2	36,1	34,5	35,0	36,4	213,5
3	35,1	35,6	38,7	35,3	35,7	36,4	216,8

Как видно из табл. 1, в варианте 3 получена даже несколько большая сила тяги, чем для исходного варианта. Это можно объяснить тем, что при не смазанных рельсах часть силы тяги расходуется на преодоление большего сопротивления движению локомотива в кривой.

В результате проведенного компьютерного моделирования движения четырехосного ва-

гона в кривой  $R = 300$  м получены следующие выводы:

1. Наиболее эффективным вариантом смазывания рельсов в кривых участках пути является смазывание боковой поверхности наружного рельса и поверхности катания внутреннего. При снижении коэффициента трения на поверхности катания внутреннего рельса с расчетного значе-

ния 0,25 до 0,18 такой вариант смазывания позволяет снизить фактор износа колес и рельсов и боковое воздействие на путь в кривых участках пути на 36 % для грузового вагона.

2. Смазывание поверхности катания внутреннего рельса существенно влияет на величину коэффициента безопасности по всползанию колеса на рельс.

При одноточечном контакте для расчета данного коэффициента используется формула

$$\lambda = F_z / |F_y|,$$

где  $F_z$ ,  $F_y$  – вертикальная и поперечная проекции суммарной силы, действующей на колесо. В случае двухточечного контакта рассчитывается как

$$\lambda = \frac{F_z \operatorname{tg} \beta_2 - \mu}{F_y \mu \operatorname{tg} \beta_2 + 1},$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $\beta_2$  – угол между нормальной реакцией на гребне и вертикалью.

Анализ полученных результатов показывает, что смазывание поверхности катания внутреннего рельса в кривой приводит к увеличению коэффициента запаса устойчивости в 2 раза. Такой эффект наблюдается как для груженого, так и для порожнего вагонов. Причина улучшения коэффициента запаса устойчивости состоит в том, что смазывание боковой грани наружного рельса и поверхности катания внутреннего снижает поперечные силы на набегающих колесах при мало изменяющейся нормальной реакции на тех же колесах.

Для проверки данных, полученных компьютерным моделированием, во ВНИКТИ был поставлен масштабный эксперимент [1].

Анализ результатов эксперимента полностью подтверждает полученную ранее высокую эффективность лубрикации по варианту III. Так, для набегающей первой оси в диапазоне скоростей 30...70 км/ч в варианте III по сравнению с исходным вариантом I боковые силы снизились по Шлюмпфу на 28...70 % и по компьютерному моделированию на 33...78 % для секции тепловоза 2ТЭ116.

Для проведения испытаний собран опытный поезд в составе секции тепловоза 2ТЭ116, вагона-лаборатории и груженого вагона с нагрузкой на ось 23,5 тс. Бандажки колес тепловоза 2ТЭ116 имели конический профиль. Заезды производились по трем вариантам:

- вариант I – оба рельса не смазаны;
- вариант II – смазана боковая поверхность головки наружного рельса;
- вариант III – смазаны боковая поверхность головки наружного рельса и поверхность катания внутреннего.

Опытные поездки осуществлялись в кривой радиусом 300 м. Кривые участки пути выбирались так, чтобы на них можно было реализовать непогашенное ускорение до 0,7 м/с<sup>2</sup>. Скорости движения в кривой радиусом 300 м – 30, 50, 70 км/ч.

Оценка воздействия на путь выполнена по полуразности кромочных напряжений в подошве рельса (точечная оценка), по боковым силам, измеренным методом Шлюмпфа (интегральная оценка), и расчетным значениям боковых сил методом компьютерного моделирования [2].

Для смазывания боковой поверхности наружного рельса в кривой применялась рельсовая смазка РС-6 «В», для смазывания поверхности катания внутреннего рельса – модификатор трения МТ-2, разработанный для применения в технологии комбинированной лубрикации рельсов. Смазочные покрытия наносились по всей длине тензометрического участка.

Для определения коэффициента трения на боковой поверхности головки наружного и поверхности катания внутреннего рельсов использовался специально разработанный трибометр [3].

Результаты измерений коэффициента трения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Место измерения коэффициента трения	Вариант I	Вариант II	Вариант III
Боковая поверхность головки наружного рельса	0,3...0,35	0,06...0,08	0,06...0,08
Поверхность катания внутреннего рельса	0,25...0,3	0,25...0,3	0,18...0,2

По результатам испытаний по воздействию на путь вагона с нагрузкой на ось 23,5 тс получены данные о том, что комбинированная лубрификация снижает боковое воздействие на путь в 4,5 раза при скорости 30 км/ч и на 17 % при скорости 70 км/ч.

Результаты экспериментальных исследований применения комбинированной лубрикации рельсов позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Экспериментальные исследования бокового воздействия тепловоза и груженого вагона на путь подтвердили результаты компьютерного моделирования. Получена удовлетворительная сходимость результатов – разница не превышает 15 %.

2. Ходовые динамические и по воздействию на путь испытания четырехосного вагона показали, что при нанесении смазки одновременно на боковую поверхность наружного рельса и на поверхность катания внутреннего рельса по сравнению с вариантом на несмазанных рельсах боковые силы снижаются в 4,5 раза при скорости 30 км/ч и на 17 % при скорости 70 км/ч.

3. Ходовые динамические и по воздействию на путь испытания шестиосного тепловоза показали, что при нанесении смазки одновременно на боковую поверхность наружного рельса и на поверхность катания внутреннего рельса для экипажей с трехосными тележками для набегавшей первой оси в диапазоне скоростей 30...70 км/ч по сравнению с вариантом на несмазанных рельсах боковые силы снижаются на 28...70 %.

На основании положительных результатов теоретического и экспериментального исследований эффективности комбинированной лубрикации рельсов, по заказу ОАО «РЖД», разработаны технические решения на рельсосмазыватель комбинированный для грузовых локомотивов ВЛ10, ВЛ80 и на рельсосмазыватель вагонный для работы в составе поезда и изготовлены опытные образцы рельсосмазывателей (рис. 1).



Рис. 1. Электровоз оборудованный рельсосмазывателем

Для комбинированной лубрикации, совместно с ООО «КГП» (г. Воскресенск, Моск. обл.), были разработаны 8 видов смазочных покрытий. Ускоренные испытания смазочных покрытий проводились на машине трения СМЦ-2 по типу диск–диск.

Так как лабораторные испытания имеют сравнительный характер, то базой для сравне-

ния выбраны смазочные покрытия РС-6 «В» и РС-6 «Ву», поскольку известна их износостойкость проверенная многолетней эксплуатацией рельсосмазывателей конструкции ВНИТИ. Износостойкость этих смазочных покрытий определялась на полигонах эксплуатации рельсосмазывателей конструкции ВНИТИ с помощью трибометра и составляет 3500 осей колесных пар у смазочного покрытия РС-6 «В» и 4500 осей колесных пар у смазочного покрытия РС-6 «Ву» (рис. 2).

Сравнивая результаты лабораторных испытаний опытных образцов смазочных покрытий относительно смазочных покрытий РС-6«В» и РС-6«Ву», можно определить примерную износостойкость каждого опытного образца. Так, например, износостойкость смазочного покрытия РС-6«В» в 3500 осей колесных пар соответствует 42 минутам работы образцов на машине трения СМЦ-2.



Рис. 2. Технология комбинированной лубрикации рельсов

В процентном пересчете износостойкость смазочного покрытия РС-6 «Ву» на машине трения должна составлять около 54 минут работы, что и было подтверждено лабораторными исследованиями.

На основании полученных данных определена износостойкость для остальных образцов смазочных покрытий. Для подтверждения результатов износостойкости смазочных покрытий полученных на машине трения СМЦ-2, были проведены полигонные испытания модификатора трения МТ-2, с предполагаемой износостойкостью 300 осей колесных пар. Проведенный эксперимент на полигоне ВНИКТИ, с применением трибометра, подтвердил правильность метода ускоренных испытаний смазочных покрытий, на машине трения СМЦ-2: модификатор трения МТ-2 имеет износостойкость 300 осей колесных пар с коэффициентом трения не ниже  $\phi = 0,18$ .

По результатам ускоренных испытаний опытных образцов для комбинированной лубрикации рельсов отобраны и рекомендованы к применению наиболее оптимальные по износостойкости смазочные покрытия: МТ-2 – моди-

фактор с износостойкостью 300 осей с коэффициентом трения не ниже  $\varphi = 0,18$ ; РС-6 «В2У» – лубрикант с износостойкостью 5700 осей с коэффициентом трения не ниже  $\varphi = 0,06$ .

Применение локомотива, оборудованного рельсосмазывателем и выполняющим одновременно перевозочную работу и лубрикацию, позволит снизить эксплуатационные расходы на 1,78 млн руб./год.

Экономия годовых эксплуатационных расходов складывается из:

1. Экономии от уменьшения выхода рельсов по боковому износу 329,6 тыс. руб.;

2. Экономии затрат на обточки колесных пар локомотивов 337,5 тыс. руб.;

3. Экономии локомотивами энергоресурсов на тягу поездов за счет снижения сопротивления движению поездов 1115,5 тыс. руб. Затраты на оборудование локомотива рельсосмазывающим устройством составляют 650 тыс. руб.

Срок окупаемости потребных инвестиций без учета снижения количества обточек вагонных колес – 6 месяцев.

### Выводы

Результаты представленных в работе исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Теоретическими исследованиями научно обосновано снижение бокового воздействия подвижного состава на путь применением комбинированной лубрикации рельсов за счет перераспределения продольных сил крипа по колесам таким образом, что создается момент, отворачивающий колесные пары от наружного рельса, и тележку в целом, и уменьшаются суммарные поперечные силы крипа колесных пар.

2. Результаты моделирования показали, что смазывание боковой поверхности наружного рельса и поверхности катания внутреннего рельса дает:

– снижение бокового воздействия на путь локомотива при низкой скорости движения: до 40 % при колесах с коническим профилем, а вагона при низкой скорости движения – на 36 % при колесах с коническим профилем;

– повышение величины коэффициента безопасности порожнего вагона по всползанию на рельс в два раза;

– уменьшение углов набегания направляющих колесных пар локомотива на 3...4 %;

– уменьшение фактора износа по удельной работе сил трения на гребнях направляющих колес локомотива: в 11 раз при  $v = 70$  км/ч и в 4,1 раза при  $v = 70$  км/ч;

– уменьшение удельной работы сил трения на гребне набегающего колеса первой колесной пары вагона 60...20,8 кДж, а суммарная работа уменьшится 89...57,6 кДж или в относительных величинах на 35 %.

3. Натурные испытания показали, что при нанесении смазки одновременно на боковую поверхность наружного рельса и на поверхность катания внутреннего рельса для экипажей с трехосными тележками для набегающей первой оси в диапазоне скоростей 30...70 км/ч по сравнению с исходным вариантом боковые силы снижаются на 28...70 %. Комбинированная лубрикация снижает боковое воздействие на путь груженого вагона в 4,5 раза при скорости 30 км/ч и на 17 % при скорости 70 км/ч.

Получена удовлетворительная сходимость результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента, расхождение не превышает 15 %.

4. По результатам компьютерного моделирования и натуральных испытаний определены рациональные значения коэффициентов трения на контактных поверхностях головок рельсов, которые составляют на боковой грани наружного рельса –  $\varphi = 0,06...0,15$ , а на поверхности катания внутреннего рельса –  $\varphi = 0,18...0,25$ .

5. Разработаны и внедрены на Московской ж. д. рельсосмазыватели на базе локомотива и вагона для работы в составе поезда с применением технологии комбинированной лубрикации.

6. Рекомендованы к применению в технологии комбинированной лубрикации рельсов разработанные смазочные покрытия, прошедшие лабораторные и полигонные испытания: МТ-2 – модификатор с износостойкостью 300 осей с коэффициентом трения не ниже  $\varphi = 0,18$ ; РС-6 «В2У» – лубрикант с износостойкостью 5700 осей с коэффициентом трения не ниже  $\varphi = 0,06$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панин Ю. А. Снижение бокового воздействия на путь как результат применения комбинированной лубрикации / Ю. А. Панин, В. С. Коссов, А. В. Трифионов // Исследование узлов и агрегатов подвижного состава: Труды ВНИКТИ, – Коломна, – 2005, – Вып. 85. – С. 153–160.
2. Панин Ю. А. Методы оценки воздействия колес подвижного состава на путь // Труды ВНИКТИ, Коломна, 2003, – Вып. 82, – С. 170–179.
3. Патент на изобретение. № 2220410 РФ В61К 13/00 Трибометр / Пузанов В. А., Добрынин Л. К., Коссов В. С., Панин Ю. А., Халявин В. С., Гапченко В. Н., Чижиков А. Н. Приоритет 25.09.2002. Оpubл. 27.12.2003. Бюл. № 36.

Поступила в редколлегию 16.11.2006.