

УДК 629.4.067.4

*Н. И. Горбунов, д.т.н., профессор
(заведующий кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)*

*М. В. Ковтанец, к.т.н.
(доцент кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)*

*Е. С. Ноженко, к.т.н., доцент
(докторант кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)*

*О. В. Просвинова
(старший преподаватель кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)*

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СЦЕПНЫХ КАЧЕСТВ ЛОКОМОТИВОВ

Постоянный рост секционной и осевой мощности современных локомотивов остро ставит проблему совершенствования их тяговых качеств, улучшения использования мощности для тяги. В статье проведен обзор и анализ имеющихся теоретических и экспериментальных исследований, направленных на улучшение тяговых и динамических характеристик локомотивов.

На основании изученной информации авторами сформулированы следующие задачи дальнейших исследований для повышения и стабилизации тягово-сцепных качеств локомотива: разработка способа повышения тяговых качеств тепловоза на основе учета степени изменения предельных по сцеплению возможностей каждой колесной пары экипажа под действием различных факторов и его реализация в конструкции локомотива путем преднамеренного изменения нагрузок колесных пар на рельсы для выравнивания максимальных сил сцепления на всех колесных парах; получение количественных характеристик влияния динамических факторов на тяговые возможности каждой колесной пары и локомотива в целом; исследование влияния первой и второй ступени рессорного подвешивания на динамические и тяговые качества локомотива; исследование технических решений для улучшения динамических и тяговых качеств локомотива;

**© Горбунов Н. И., Ковтанец М. В., Ноженко Е. С., Просвинова О. В.,
2018**

создание стендового оборудования и измерительных устройств для экспериментального исследования характеристик опытных узлов.

Ключевые слова: тепловоз, колесные пары, коэффициент сцепления, динамика, тяговые качества, развеска.

Постановка проблемы. Постоянный рост секционной и осевой мощности современных тепловозов с новой остротой ставят проблему совершенствования их тяговых качеств, улучшения использования мощности для тяги.

Анализ последних исследований и публикаций. Как известно, степень использования мощности силовой установки локомотива определяется взаимным положением характеристики ограничения по сцеплению и по касательной мощности. На рис. 1 представлены тяговые характеристики двух тепловозов различной мощности, причем, $N_{ел} > N_{ел}$. Диапазон скоростей, в котором действует ограничение по сцеплению, а значит, отсутствует возможность полного использования мощностей ($N_{ел}$ или $N_{ел}$), возрастает с увеличением последних $(O-V_2) > (O-V_1)$. Как показывают проведенные исследования режимов работы тепловоза 2ТЭ116, находящегося в рядовой эксплуатации грузового движения, большую часть времени он используется на низких скоростях, реализуя близкие к максимальным значения силы тяги [1]. Продолжительность работы локомотива в диапазоне 0-20 км/ч составляет 40% от общего времени. Для тепловозов большей мощности надо ожидать увеличения продолжительности работы при ограничении мощности по сцеплению, т.е. снижения эффективного ее использования.

Поэтому вопросы повышения максимальных сил сцепления локомотивов и эффективности использования при этом их мощности постоянно находятся в поле зрения ученых и конструкторов.

Цель статьи. Обзор и анализ имеющихся теоретических и экспериментальных исследований, направленных на улучшение тяговых и динамических характеристик локомотивов. На основании полученной информации необходимо сформулировать задачи дальнейших исследований для повышения и стабилизации тягово-сцепных качеств локомотива.

Изложение основного материала исследования

Возможности реализации максимальной силы сцепления в контакте колеса с рельсом

Основным показателем, определяющим потенциальные возможности контакта колеса с рельсом по сцеплению, обычно считают физический коэффициент сцепления ψ_0 , равный отношению максимальной силы сцепления $F_{сч. max}$ развиваемой одиночным колесом при трогании с места при постоянной вертикальной нагрузке P_e и отсутствии каких бы то ни было динамических возмущений, к этой нагрузке.

$$\psi_0 = \frac{F_{сч. max}}{P_e}. \quad (1)$$

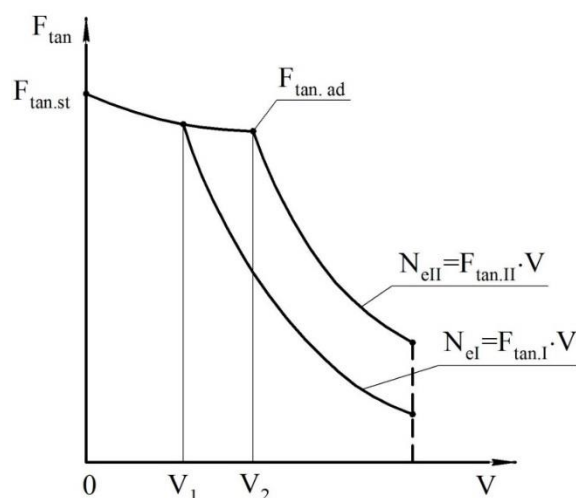


Рис. 1. Тяговая характеристика тепловозов с электрической передачей и разной секционной мощностью (кривые I и II)

Практически все данные по физическому коэффициенту сцепления получены экспериментально. Достаточно надежных расчетных методов его определения пока не существует. В лабораторных условиях при трении стали по стали его значения доходят до 0,6-0,7 [2]. Свидетельством больших резервов контакта двух металлических поверхностей в отношении сцепления являются опыты, описанные в работе [3], в которых удалось получить значения коэффициента трения в вакууме до 5.

Однако на практике физические коэффициенты сцепления, замеренные на железных дорогах, имеют значительный разброс и редко превышают значения 0,40-0,45, зарегистрированы и более низкие значения вплоть до 0,06 [4, 5]. Основной причиной их снижения являются загрязнения поверхностей катания рельсов и колес маслами, пылью в сочетании с водой, остатками песка, опавшей листвой, продуктами износа поверхностей и др.

Влияние динамических показателей локомотива на максимальный коэффициент сцепления

Снижение тяговых возможностей контакта колеса с рельсом с увеличением скорости качения объясняют двумя основными причинами. Во-первых, увеличением интенсивности динамических процессов в системе колесо-рельс. Во-вторых, явлениями, связанными с продолжительностью контактирования, пластичностью материалов колеса и рельса. Что касается последней причины, то возможности ее устранения представляются весьма ограниченными, в то время как первая, связанная с динамическими характеристиками экипажа, вполне поддается управлению.

Не останавливаясь на подробном анализе этих работ, отметим, что в них рассматривались вертикальное и горизонтальное взаимодействие локомотивов и пути, процессы движения в прямых, в кривых и стрелочных переводах, износ колес и рельсов и другие вопросы.

Все чаще появляются работы, посвященные комплексной проблеме тягово-динамических качеств локомотивов, в которых процессы в контактах колес с рельсами

тесно увязываются с динамическими характеристиками экипажа и, наоборот, колебания элементов подвижного состава рассматриваются с учетом закономерностей сцепления [6, 7, 8, 9].

Рядом исследователей отмечено снижение максимального коэффициента сцепления при реализации локомотивом силы тяги в кривых участках пути. В результате проведенных опытов выяснено, что коэффициент в кривых уменьшается на 20-30% [10, 11].

Исследования, направленные на улучшение динамических показателей локомотивов путем конструктивного усовершенствования ходовых частей и прежде всего рессорного подвешивания, кроме основной задачи, решают вопрос улучшения условий сцепления в контакте колеса с рельсами.

Влияние характеристик рессорного подвешивания на тяговые качества локомотива

Одним из важных вопросов, решаемых при конструировании ходовой части локомотивов, является задача равномерного распределения вертикальных нагрузок по колесным парам при реализации силы тяги. Для локомотивов с индивидуальным приводом колесных пар максимальная сила тяги ограничена силой сцепления лимитирующей оси. Максимальное значение силы сцепления определяется как сумма сил сцепления всех его колесных пар, не превышающих силу сцепления лимитирующей.

$$F_{cц. max} = n \cdot F_{cц. max} = n \cdot P_{г min} \cdot \psi_{max}, \quad (2)$$

где n – число тяговых осей; $F_{cц. max}$ – максимальная сила сцепления лимитирующей оси; $P_{г min}$ – вертикальная нагрузка на лимитирующей оси; ψ_{max} – максимальный коэффициент сцепления.

В случае достижения на лимитирующей колесной паре максимальной силы сцепления, дальнейшее повышение силы тяги локомотива невозможно, хотя силы сцепления других осей не достигли своего предела, т.е. их тяговые возможности, а вследствие этого и тяговые возможности всего локомотива, недоиспользуются.

Таким образом, локомотив будет реализовывать максимальную силу тяги, когда силы сцепления всех его осей равны между собой.

Причиной появления на локомотиве лимитирующей колесной пары является, прежде всего, перераспределение вертикальных нагрузок из-за действия опрокидывающего момента сил тяги.

Динамический характер реализации силы тяги оказывает большое влияние на процесс сцепления локомотива с рельсами. Опыт отечественного и зарубежного локомотивостроения свидетельствуют о том, что динамические показатели экипажа во многом определяются конструкцией и характеристиками рессорного подвешивания. При разработке перспективных локомотивов перед конструкторами стоит обширный круг предъявляемых требований по уменьшению динамического воздействия на путь, перераспределения нагрузок по колесным парам, равных сил и углов набегания в прямых и кривых участках пути и т.д., что вынуждает к поиску новых технических решений, направленных на совершенствование экипажной части как в первой, так и во второй ступени рессорного подвешивания.

Существенное влияние на тяговые качества тепловоза оказывает неравномерное распределение вертикальных нагрузок по сторонам колесных пар. Согласно полученным зависимостям, каждый процент различия нагрузок между колесами вызывает уве-

личение относительной скорости скольжения оси на 0,25-0,45%, тем самым увеличивая ее склонность к боксованию. Причиной неравномерного распределения нагрузок по сторонам колесной пары могут являться погрешности от развески, неустойчивость кузова локомотива на опорах, возвышение рельса в кривых и т.д. Так, например, при обследовании тепловозов выявлено смещение центра тяжести кузова относительно поперечных осей тележек, достигающее 20 мм, что приводит к изменению нагрузок по сторонам тележек до 20 кН и, как следствие, к повышению скорости относительного скольжения колесных пар.

Поэтому исследования характеристик связей кузова с тележками и дальнейшее совершенствование их конструкций является одним из резервов повышения тяговых качеств локомотивов.

Анализ развития конструктивных схем буксового рессорного подвешивания свидетельствует о стремлении конструкторов решить проблему повышения тяговых качеств локомотивов путем применения сбалансированного рессорного подвешивания. При всех достоинствах сбалансированного подвешивания оно обладает большим весом, более сложное. Кроме того, нельзя считать это решение наиболее эффективным и с точки зрения тяговых качеств, тем более, что возможности индивидуального подвешивания в этом направлении далеко не исчерпаны.

Распределение условий сцепления по колесным парам локомотива

Вопрос влияния динамических показателей локомотива на его тяговые качества приобретает в настоящее время особый интерес. Однако, необходимо отметить, что оценка этого влияния производится по общим динамическим свойствам локомотива без учета особенностей поведения отдельных колесных пар. Очевидным будет предположить, что степень снижения сцепных свойств каждой в отдельности колесной пары локомотива отличается в той же мере, в какой отличаются условия ее динамического взаимодействия с рельсами.

Анализ статистических данных распределения боксований по колесным парам тепловоза с трехосными тележками и индивидуальным рессорным подвешиванием, свидетельствует о том, что четвертая колесная пара, являясь наиболее разгруженной, боксовала только в 24% случаев, а первая ось – в 50% случаев. Для тепловоза со сбалансированным рессорным подвешиванием в подавляющем большинстве случаев (65%) боксовала первая колесная пара несмотря на высокую степень равномерности распределения нагрузок по осям. Это подтверждает предположение о том, что боксование колесной пары определяется не только ее разгрузкой, но и другими факторами, влияющими на условия сцепления.

Остановимся подробнее на работах, определяющих зависимость вертикальных динамических нагрузок в контакте от порядкового номера по ходу движения колесной пары.

Экспериментальные исследования распределения коэффициента вертикальной динамики по колесным парам установили, что траектории всех шести колесных пар подобны, но сдвинуты по фазе: амплитуды колебаний динамической нагрузки на второй и пятой колесных парах составляют 60-70%, а третьей и четвертой – 85-95% от амплитуд 1 и 6 осей (рис. 2).

Уменьшение амплитуд колебаний на средних колесных парах объясняется отличием условий их взаимодействия с рельсовой колеей. Испытания тепловоза также подтвердили неравномерность распределения коэффициента вертикальной динамики по осям.

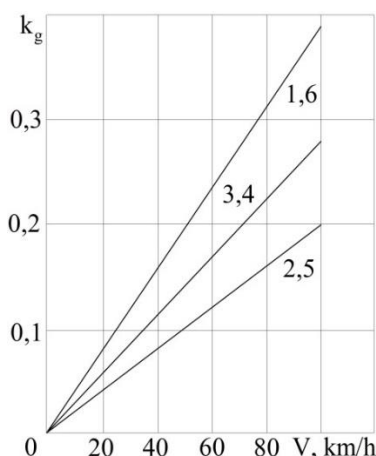


Рис. 2. Распределение коэффициентов вертикальной динамики по 1-й, 2-й, ... 6-й колесным парам

Наибольший коэффициент вертикальной динамики получен по первой (направляющей) оси, наименьший – по средним осям каждой тележки. Испытания тепловоза с заблокированными балансирами (индивидуальное рессорное подвешивание), проведенные с участием авторов, также показали неравномерность динамических прогибов буксовых пружин колесных пар, которая сохраняется практически на всех скоростях движения [12]. Если принять коэффициент вертикальной динамики по первой и шестой оси за 100%, то для третьей и четвертой оси он составил 85%, а для второй и пятой – 60%. Таким образом, лимитирующими с точки зрения динамических разгрузок колесных пар являются первая и шестая оси, а вторая и пятая имеют резерв повышения реализуемой силы тяги.

Исследования колебаний локомотива при трогании с места на горизонтальной площадке и на руководящем подъеме показали, что для тепловоза разгрузка первой колесной пары может достичь 40-50 кН и даже – 60-70 кН.

Анализ полученных результатов показал, что разгрузка лимитирующих колесных пар локомотивов в режиме тяги с учетом колебаний подергивания превышает статические разгрузки от реализуемой силы тяги при постоянном фиксированном ее значении [13], что необходимо учитывать в случаях проведения проверки массы состава при трогании с места, а также при расчете движения с малыми скоростями.

Дальнейшим развитием этих работ явилось бы определение влияния колебаний подергивания локомотива на разгрузку всех его колесных пар и, с учетом этого, определение потенциальных значений максимальной силы их сцепления.

Неравномерность распределения сил, действующих на колесные пары в горизонтальной плоскости, отмечается многими авторами. Действие горизонтального усилия на колесную пару, вызванного неровностями пути в плане, прохождением кривых участков пути или обычным вилянием, обуславливает наличие поперечного проскальзывания.

При движении локомотива в прямом участке пути с небольшими скоростями, когда поперечные колебания экипажа не сопровождаются касанием гребней колес о рельсы, можно считать, что ограничение поперечных перемещений колесных пар обусловлено силами, вызванными их проскальзыванием по рельсам.

Испытания по определению рамных сил, а также воздействия на путь локомотива при движении в прямых и кривых участках пути, а также по стрелочным переводам

показали, что силы эти для каждой колесной пары значительно отличаются. Так многочисленные эксперименты, проведенные на моделях [14], показали, что в кривых участках пути наибольшая рамная сила действует по первой и шестой колесным парам, а вторая и пятая находятся в лучших условиях (рис. 3). Испытания тепловоза, проведенные с участием авторов, выявили неравномерность воздействия на путь колесных пар при прохождении горизонтальных неровностей пути. Наибольшее воздействие оказывает первая по ходу движения колесная пара, а значит и значение ее горизонтального скольжения также наибольшее.

По результатам исследований износа бандажей и подреза гребней колесных пар, проведенных авторами в депо, предельные значения подреза и износа достигаются на первой колесной паре в 87% случаев, а на третьей в 3%, что также является косвенным подтверждением неравномерного распределения поперечных сил, действующих в контактах каждой колесной пары с рельсами. К факторам, по разному проявляющимся на каждой колесной паре, может быть отнесен и физический коэффициент сцепления.

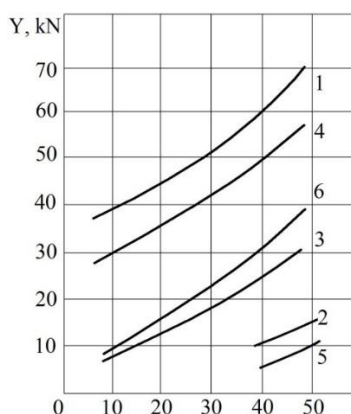


Рис. 3. Распределение рамных сил по колесным парам тепловоза в кривом участке пути

Рядом экспериментальных исследований доказано существование эффекта механической очистки рельсов колесной парой, реализующей силу тяги и торможения, при этом физический коэффициент сцепления после прохождения каждой колесной пары повышается на 0,01-0,02. Это явление также отмечено при исследовании работы локомотивов по системе многих единиц. Хвостовой локомотив реализует коэффициент сцепления 0,20-0,28 в условиях, когда коэффициент сцепления головного локомотива составляет 0,23-0,25 [15].

Ввиду недостаточности сведений по данному вопросу для различных условий сцепления, особенно при трогании локомотива, авторами среди прочих задач поставлена цель определения количественных зависимостей очистки рельса впереди идущими колесными парами.

Анализ особенностей развески локомотивов

Кроме рассмотренных динамических факторов неравномерность распределения нагрузок колесных пар закладывается уже на этапе развески локомотивов. При определении тяговых качеств тепловозов обычно полагают, что в статическом состоянии все колесные пары имеют одинаковые нагрузки на рельсы. Нагрузка принимается равной номинальной, определенной по формуле:

$$P_{ном} = \frac{G}{n}, \quad (3)$$

где G – расчетный вес тепловоза; n – число колесных пар.

В действительности нагрузки от колесных пар на рельсы имеют отклонения от расчетных, которые, согласно техническим условиям на поставку тепловозов, не должны превышать $\pm 3\%$ [16]. В режиме реализации силы тяги наиболее благоприятные условия для перехода в боксование создаются у той колесной пары, которая имеет наименьшую нагрузку на рельсы при прочих равных условиях; ее называют лимитирующей по развеске. При уменьшении действительной нагрузки колесной пары по сравнению с расчетной (номинальной) на 3% происходит пропорциональное снижение ее максимальной силы тяги, т.е. статический коэффициент использования сцепного веса не превышает 0,97.

Причинами неравномерного распределения нагрузок по колесным парам локомотива в статическом состоянии могут явиться продольное смещение его центра тяжести, различие жесткостей буксовых пружин и опор кузова на тележку, геометрические несовершенства рам кузова и тележек. В процессе эксплуатации локомотивов могут произойти нарушения первоначальной регулировки буксового подвешивания, а также изменения жесткости опор кузова на тележку, например, из-за релаксационных процессов, происходящих в резиновых элементах.

Обследования характеристик вертикальной жесткости упругих элементов рессорного подвешивания показали, что жесткость резино-металлических элементов опор имеет значительный разброс из-за различий в твердости резины и высоте блоков, а отклонения в жесткости буксовых пружин имеют меньший разброс. К тому же, жесткость опор кузова тепловоза значительно больше жесткости буксовых пружин, поэтому отклонения параметров опор оказывают более сильное влияние на перераспределение нагрузок по колесным парам. Кроме того, так как жесткость главной рамы локомотива достаточно велика, то даже сравнительно небольшая неплоскостность ее опорных поверхностей вызывает ощутимое изменение нагрузок по опорам. Из сказанного следует, что основную роль в неравномерном распределении нагрузок от колесных пар на рельсы играют параметры второй ступени рессорного подвешивания.

В работе приведен анализ результатов взвешивания на весах тепловозов на бесчелюстных тележках, у которых индивидуальное рессорное подвешивание. Масса кузова с установленным в нем оборудованием передается через восемь опор с резино-металлическими элементами на две тележки, а от них через комплекты пружин на колесные пары. При взвешивании тепловозов, в случае отклонения осевых нагрузок от требуемых величин, допускается регулировка рессорного подвешивания с помощью прокладок, устанавливаемых между упругими элементами и опорными поверхностями. По результатам взвешиваний выполнена статистическая обработка замеров [17, 18, 19]. Проверка справедливости гипотезы нормальности распределения выборок значений нагрузок на каждую ось тепловозов произведена по показателям асимметрии и эксцесса. Для условий нормального распределения определены математическое ожидание, среднеквадратические отклонения нагрузок на каждой колесной паре тепловоза, а также вычислены коэффициенты использования сцепного веса от развески для средних и минимально-вероятных нагрузок по следующим зависимостям:

$$M(P_{cm}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n P_j, \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_j - M(P_{cm}))^2}, \quad (5)$$

$$P_{cm}^{min} = M(P_{cm}) - 2,5 \cdot S, \quad (6)$$

$$\eta_0^{cp} = \frac{M(P_{cm})}{P_{ном}}, \quad (7)$$

$$\eta_0^{min} = \eta_0^{cp} - 2,5 \cdot \frac{S}{P_{ном}}, \quad (8)$$

Результаты статистической обработки взвешиваний, условные обозначения и их расшифровка представлены в табл. 1 и на рис. 4, 5.

Таблица 1. Результаты статистической обработки взвешиваний

Показатель	Условное обозначение	Номер колесной пары		
		1(6)	2(5)	3(4)
Количество опытов	n	200	200	200
Математическое ожидание нагрузки от колесной пары на рельсы, кН	$M(P_{cm})$	226,1	230,49	228,1
Среднеквадратическое отклонение нагрузки, кН	S	2,77	1,67	2,6
Минимально-вероятное значение нагрузки, кН	P_{cm}^{min}	219,1	225,8	221,6
Коэффициент использования сцепного веса для математического ожидания нагрузки	η_0^{cp}	0,983	1,002	0,991
Коэффициент использования сцепного веса для минимально-вероятного значения нагрузки	η_0^{min}	0,952	0,981	0,963

Полученные результаты показывают: математическое ожидание нагрузок первой и шестой осей колесных пар тепловоза меньше номинальных на 1,7%, третьей и четвертой – на 0,8%, а для второй и пятой – больше номинальной на 0,2%. Разность математических ожиданий нагрузок по осям составляет 1,9-1,0%, т.е. средние колесные пары имеют нагрузки на 1,9% больше, чем первая и шестая, и на 1,0% больше, чем третья – четвертая. Среднеквадратические отклонения нагрузок средних колесных пар каждой тележки меньше, чем крайних, на 1,1-0,9 кН. Характерной особенностью распределения нагрузок от колесных пар на рельсы является то обстоятельство, что лимитирующими с точки зрения развески оказываются крайние колесные пары тележек. Причем, действительные нагрузки крайних колесных пар тележек оказываются близкими к максимально-вероятному значению у одной и минимально-вероятному значению у другой. Для минимально-вероятных значений нагрузок от колесных пар на рельсы разность между их значениями для средних и крайних колесных пар составляет 6,7-4,2 кН.

Таким образом, анализ взвешиваний тепловозов показал, что распределение нагрузок по колесным парам характерно тем, что крайние колесные пары каждой тележки имеют нагрузки меньше номинальной, а математические ожидания нагрузок средних

колесных пар на 1-2% больше, чем для крайних. Для минимально-вероятных значений нагрузок эта разность составляет 2,9-1,8%, т.е. средние колесные пары тележек имеют некоторый запас по сцеплению, в сравнении с крайними.



Рис. 4. Статические характеристики распределения нагрузок от колесных пар на рельсы

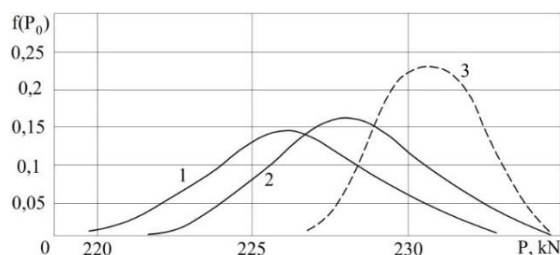


Рис. 5. Функции распределения нагрузок от колесных пар на рельсы при развеске

После пробега 200 тыс. км нагрузки на опорах изменяются еще в большей степени вследствие неодинаковой высоты и жесткости резинометаллических элементов. При этом перегрузка отдельных опор может достигать 6-8%, что в свою очередь приводит к изменению нагрузок по колесным парам. Отклонения нагрузок по колесным парам еще при не самых неблагоприятных комбинациях отклонений нагрузок по опорам достигают 4,0-4,5% и даже 6,0-7,0%. Замеры нагрузок на колесных парах у тепловозов с вышеуказанными пробегами показали, что разность в нагрузках крайних и средних колесных пар тележек достигает 3,0-4,5%.

Проведенный анализ развески локомотивов позволяет сделать вывод о том, что средние колесные пары каждой тележки находятся в лучших по сцеплению условиях и не могут являться лимитирующими с точки зрения развески.

Максимальную силу сцепления колесной пары локомотива можно представить как функцию двух переменных – составляющей вертикальной нагрузки на ось $P_{\sigma i}$ и коэффициента сцепления $\psi_{\max i}$. Задача реализации максимальной силы сцепления

$F_{cy, max}^{лок}$ локомотивом с индивидуальным приводом колесных пар, очевидно, будет решена в случае одновременного достижения всеми колесными парами своих пределов по сцеплению, т.е.

$$F_{cy, max1} = F_{cy, max2} = \dots F_{cy, maxn}, \quad (9)$$

или

$$P_{\epsilon i} \cdot \psi_{maxi} = idem \cdot (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10)$$

Одним из основных способов решения этой задачи считается создание устройств и конструкций ходовых частей, позволяющих выравнивать статические составляющие нагрузки от колесных пар на рельсы за счет компенсации их перераспределения в режиме тяги. При этом руководствуются соображениями, что локомотив, создающий на всех режимах движения равные статические составляющие нагрузки от колесных пар на рельсовый путь имеет наилучшие тяговые качества. Существует целое направление по повышению коэффициента использования сцепного веса, который, собственно, и характеризует степень неравномерности этих нагрузок. Проведенный автором анализ особенностей реализации колесными парами локомотива сил сцепления показывает ограниченность эффективности методов, основанных на таком подходе из-за существенных отличий в условиях сцепления разных колесных пар. В самом деле, как видно из (10), равенство $P_{\epsilon 1} = P_{\epsilon 2} = \dots P_{\epsilon n}$ не обеспечивает условия (10) из-за отличий ψ_{maxi} . К числу факторов, влияющих на условия каждой из колесных пар, относятся коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики, продольные и поперечные проскальзывания в контактах, вертикальные нагрузки, эффект очистки рельса впереди идущим колесом и т.п.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями отмечено, что коэффициенты вертикальной динамики для первой колесной пары, как правило, на 40-60% выше, чем на второй, и на 15-20% выше, чем на третьей. Коэффициенты горизонтальной динамики для первой колесной пары соответственно выше на 40-50% и на 20-25%. Очистка рельсов впереди идущей колесной парой повышает физический коэффициент сцепления на второй и третьей колесных парах соответственно на 2-6% и 6-12%.

Безусловно, работы по улучшению динамики локомотивов, как правило, способствуют уменьшению динамических показателей по осям, но вряд ли можно надеяться, что такое выравнивание будет полностью достигнуто. Если ввести понятие коэффициента использования сцепления как показателя, характеризующего степень снижения потенциальных возможностей колесной пары, определяемых физическим коэффициентом сцепления под действием различных факторов, то выражение (10) представляется в виде:

$$P_{\epsilon 1} \cdot \psi_0 \cdot \chi_{1j} = P_{\epsilon 2} \cdot \psi_0 \cdot \chi_{2j} = \dots P_{\epsilon n} \cdot \psi_0 \cdot \chi_{ij}, \quad (11)$$

где χ_1, χ_2, χ_i – коэффициенты использования сцепления колесных пар.

Коэффициент использования сцепления является интегральным показателем, характеризующим снижение максимального коэффициента сцепления по сравнению с физическим от различных факторов. Представим коэффициент использования сцепления i -й колесной пары в виде произведения:

$$\chi_i = \prod_{j=1}^N \cdot \chi_{ij}, \quad (12)$$

где χ_{ij} – коэффициенты использования сцепления от j -го фактора; N – количество учитываемых факторов.

Сведения о величинах коэффициентов χ_{ij} крайне ограничены. Определение их конкретных значений осложняется зависимостью от конструктивного исполнения экипажной части локомотивов. Оценка структуры и значений коэффициента использования сцепления для каждой колесной пары представляется автору как одна из основных задач диссертационной работы.

Такой подход позволил предложить способ повышения тяговых качеств локомотива, заключающийся в преднамеренном изменении нагрузок от колесных пар на рельсы с целью максимального сближения предельных сил сцепления колесных пар.

В качестве целевой функции при решении задачи может быть принята:

$$C = \sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n \left| P_{ei} \cdot \psi_{maxi} - P_{ev} \cdot \psi_{maxvi} \right| \rightarrow \min, \quad (13)$$

$$C = \sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^n \left| P_{ei} \cdot \chi_{ij} - P_{ev} \cdot \chi_{vj} \right| \rightarrow \min. \quad (14)$$

При этом коэффициенты использования сцепления χ_{ij} со своей сложной структурой рассматриваются как величины с ограниченными возможностями управления, в то время как изменение величины P_{ei} позволяет наиболее просто и эффективно достигать минимума целевой функции.

Выводы. Таким образом, на основании обзора и анализа, имеющихся теоретических и экспериментальных исследований, направленных на улучшение тяговых и динамических характеристик локомотивов, сформулированы следующие задачи исследований [20, 21, 22, 23]:

- разработка способа повышения тяговых качеств тепловоза на основе учета степени изменения предельных по сцеплению возможностей каждой колесной пары экипажа под действием различных факторов и его реализация в конструкции локомотива путем преднамеренного изменения нагрузок колесных пар на рельсы для выравнивания максимальных сил сцепления на всех колесных парах;
- получение количественных характеристик влияния динамических факторов на тяговые возможности каждой колесной пары и локомотива в целом;
- исследовать влияние первой и второй ступени рессорного подвешивания на динамические и тяговые качества локомотива;
- создание исследование технических решений для улучшения динамических и тяговых качеств локомотива;
- создание стендового оборудования и измерительных устройств для экспериментального исследования характеристик опытных узлов.

Благодарность. Исследования проводились на основе научного исследовательской работы «Создание многофункциональных наукоемких методов энергетического управления инженерией поверхностей контакта «колесо – рельс» для обеспечения эколого-эффективной передачи мощности» (№ гос. регистрации 0117U000561), финансируемых Министерством образования и науки Украины. Публикация содержит результаты исследований, проведенных по гранту Президента

Украины по конкурсному проекту Ф70 (№ гос. регистрации 0117U006252) Государственного фонда фундаментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.С. Режимы работы тепловозов 2ТЭ116 / В.С. Кудинов, С.И. Долгополов // Транспортное машиностроение. – М., 1979. – С. 13-15.
2. Генкин М.Д. Исследование характера изменения коэффициентов трения при качении с малым скольжением / М.Д. Генкин, Ю.А. Мишарин, В.С. Прохоров // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 1960. № 1. – С. 63-68.
3. Novion M. Connaissances Nouvelles sur l'adhérence des Locomotives Electriques / M. Novion, M. Bernard // Revue Generale des Chemins de fer. – 1961. – U 3. – P. 133-157.
4. Лужнов Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности / Ю.М. Лужнов. – М.: Интекст, 2003. – 144 с.
5. Попов В.А. Влияние фрикционных процессов на реализацию сцепления колес локомотива с рельсами: дис... к.т.н.: 05.22.07 / В.А. Попов. – М., 1984. – 206 с.
6. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Минов Д.К. – М.: Транспорт, 1965. – 226 с.
7. Павленко П.А. Динамический анализ и синтез параметров транспортных приводов при различных моделях упругофрикционного контакта ведомых звеньев / П.А. Павленко, В.В. Кучелевич // Материалы Второй Всесоюзной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. – Челябинск, 1977. – С. 28-36.
8. Потапов А.С. Влияние кривых на расчетную силу тяги электровоза по сцеплению / А.С. Потапов // Вестник ВНИИЖТ. – 1986. – №3. – С. 18-20.
9. Потураев В.Н. Прикладная механика резины / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, И.И. Крут. – К.: Наукова думка, 1975. – 214 с.
10. Суворов А.Г. Влияние колебаний тележки на реализуемую силу тяги при независимом и последовательном возбуждении тяговых двигателей / А.Г. Суворов // Вестник ВНИИЖТ. – 1985. – № 8. – С. 16-18.
11. Тибилов Т.А. Динамическое вписывание локомотивов с повышенными осевыми нагрузками в кривые участки пути при реализации силы тяги / Т.А. Тибилов, Ю.С. Оболенский // Повышение эффективности и качества работы электроподвижного состава. – Ростов-на-Дону, 1984. – С. 23-38.
12. Гундарь В.П. Результаты динамических и по воздействию на стрелочные переводы испытаний тепловоза 2ТЭ121 с некоторыми конструктивными особенностями экипажной части / В.П. Гундарь, Н.И. Горбунов, В.С. Титаренко, М.Л. Бурка // Создание и техническое обслуживание локомотивов большой мощности: Тез. докл. Всесоюз. научно-технич. конф., Ворошиловград, 21-23 мая 1985 г. – Ворошиловград, 1985. – С. 29.
13. Андреев А.А. Особенности тяговых и динамических качеств локомотива с упругим продольным сопряжением кузова и тележек: Автореф. дис- канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1960. – 21 с.
14. Камаев А.А. Динамика подвижного состава железных дорог. Исследования методом моделирования / А.А. Камаев, В.А. Камаева. – Тула, 1976. – 149 с.
15. Фаминский Г.В. Снова об эффективности использования песка, о системе пескоподачи на локомотивах / Г.В. Фаминский // Электрическая и тепловозная тяга. – 1964. – № 9. – С.15-23.
16. Фуфрянский Н.А. Развитие локомотивной тяги / Н.А. Фуфрянский, А.С. Нестеров, А.Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1982. – 303 с.
17. Горбунов Н.И. Особенности развески тепловозов типа 2ТЭП6, 2ТЭ10М и пути улучшения их тяговых качеств / Н.И. Горбунов, В.А. Слащев, Н.И. Крышталь. – Ворошиловград, 1986. – 11 с.
18. Фомін О.В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів як складових елементів несучих систем напіввагонів / О.В. Фомін // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: науковий журнал. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2014. – Вип. 6(54). – С. 146-153.
19. Фомін О.В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів / О.В. Фомін, А.В. Гостра // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Київ: ДЕТУТ, 2015. – Вип. 26-27. – С. 137-147.
20. Горбунов Н.И. Повышение тяговых качеств тепловозов за счет усовершенствования упругих связей тележек: дис... к.т.н.: 05.22.07 / Н.И. Горбунов; ДИИТ. – Днепропетровск, 1987. – 180 с.

21. Ковтанець М.В. Улучшение сцепных характеристик локомотива струйно-абразивным воздействием на зону контакта движущего колеса с рельсом: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / М.В. Ковтанец; ВНУ им. В. Даля. – Северодонецк, 2015. – 206 с.
22. Gorbunov M. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / Mykola Gorbunov, Vaclav Pistek, Maksym Kovtanets, Olena Nozhenko, Sergii Kara, Pavel Kučera // JVE International LTD. Vibroengineering Procedia. – 2017. – Vol. 13, ISSN 2345-0533. – P. 159 – 164.
23. Gerlici J. Slipping and skidding occurrence probability decreasing by means of the friction controlling in the wheel-braking pad and wheel-rail contacts / J. Gerlici, M. Gorgunov, K. Kravchenko, R. Domin, M. Kovtanets, T. Lack // «Manufacturing Technology». April 2017, Vol. 17, № 2. – p. 179-186.

REFERENCES

1. Kudinov B.C., Dolgoplov S.I. Rezhimy raboty teplovozov 2TE116 [Modes of operation of diesel locomotives] *Transportnoe mashinostroyeniye*. – *Transportation engineering*. – M., 1979. – pp. 13-15.
2. Genkin M.D., Misharin Y.A., Prohorov B.C. Issledovanie haraktera izmeneniya koeffitsientov treniya pri kachenii s malym skolzheniem [Study of the character of changes of friction coefficient in rolling with small slide] *Izvestiya vuzov. Ser. Mashinostroyeniye*. – *Universities news, Machinery series*, 1960, pp. 63-68.
3. Novion M., Bernard M. *Connaissances Nouvelles sur l'adhérence des Locomotives Electriques* / M. Novion, Revu Jenerala dos Chemins de fer., 1961., U 3, pp. 133-157.
4. Luzhnov Y.M. *Stsepleniye koles s relsami. Priroda i zakonomernosti* [Coupling of wheels with rails. The nature and patterns] – M.: Intekst, 2003. – 144 p.
5. Popov V.A. *Vliyaniye friktsionnykh protsessov na realizatsiyu stsepleniya koles lokomotiva s relsami* [Influence of the friction processes on the implementation of the traction of the locomotive with rails]. – M., 1984. – 206 p.
6. Minov D.K. *Povysheniye tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey* [Improve traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission] – M.: Transport, 1965.–226 p.
7. Pavlenko P.A., Kuchelevich V.V. *Dinamicheskiy analiz i sintez parametrov transportnykh privodov pri razlichnykh modelyakh uprugofriktsionnogo kontakta vedomykh zveney* [Dynamic analysis and synthesis of parameters of transport drives in various models of professional contact of the driven links] *Materialy Vtoroy Vsesoyuznoy konferentsii po inertionno-impulsnyim mekhanizmom, privodam i ustroystvam.*, – *Proceedings of the Second all-Union conference on inertial pulsed mechanism, drives and devices*, Chelyabinsk, 1977, pp. 28-36.
8. Potapov A.S. *Vliyaniye krivyykh na raschetnyuyu silu tyagi elektrovoza po stsepleniyu* [Effect of curves on the calculated tractive force of the locomotive coupling] *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Chronicle*, 1986, №3, pp. 18-20.
9. Poturaev V.N., Dyirda V.I., Krut I.I. *Prikladnaya mekhanika reziny* [Applied mechanics of rubber] – Kiev: Naukova dumka, 1975. – 214 p.
10. Suvorov A.G. *Vliyaniye kolebaniy teleshki na realizuemuyu silu tyagi pri nezavisimom i posledovatelnom vzbuzhdenii tyagovykh dvigateley* [Impact of fluctuations in truck for traction with independent and sequential excitation of the traction motors] *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Chronicle*, 1985, pp. 16-18.
11. Tibilov T.A., Obolenskiy Y.S. *Dinamicheskoe vpyisyvaniye lokomotivov s povyshennymi osevyimi nagruzkami v krivyye uchastki puti pri realizatsii sily tyagi* [Dynamic fit locomotives with high axial loads in curves track sections when implementing traction] *Povysheniye effektivnosti i kachestva raboty elektropodvizhnogo sostava* – *Improving the efficiency and quality of work of the electric rolling stock*. – Rostov-na-Donu, 1984, pp. 23-38.
12. Gundar V.P., Gorbunov N.I., Titarenko V.S., Burka M.L. *Rezultaty dinamicheskikh i po vozhdeystviyu na strelchnyye perevody ispytaniy teplovoza 2TE121 s nekotoryimi konstruktivnymi osobennostyami ekipazhnoy chasti* [Results of dynamic and effect on turnouts testing of the locomotive 2TЭ121 with some design features undercarriage] *Sozdaniye i tekhnicheskoye obsluzhivaniye lokomotivov bolshoy moshnosti: Tez. dokl. Vsesoyuzn. nauchno-tekhnich. konf.* – *Creation and maintenance of locomotives of greater power*. – Voroshilovgrad, 1985. – p. 29.
13. Andreev A.A. *Osobennosti tyagovykh i dinamicheskikh kachestv lokomotiva s uprugim prodolnym sopryazheniem kuzova i teleshki* [Peculiarities of traction and dynamic qualities of the locomotive with the elastic longitudinal coupling of the body and trucks] – Dnepropetrovsk, 1960. – 21 p.
14. Kamaev A.A., Kamaev V.A. *Dinamika podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Issledovaniya metodom modelirovaniya* [Dynamics of railway rolling stock. Study by simulation] – Tula, 1976. – 149 p.
15. Faminskiy G.V. *Snova ob effektivnosti ispolzovaniya peska, o sisteme peskopodachi na lokomotivakh* [Again about the effectiveness of the sand system escapade on locomotives] *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1964. – pp. 15-23.
16. Fufriyanskiy N.A., Nesterov A.S., Dolganov A.N. *Razvitiye lokomotivnoy tyagi* [The development of locomotive traction] – M.: Transport, 1982. – 303 p.

17. Gorbunov N.I., Slashev V.A., Kryishtal N.I. *Osobennosti razveski teplovozov tipa 2TEP6, 2TE10M i puti uluchsheniya ih tyagovyih kachestv* [Features hanging locomotives type 2ТЭП6, 2TE10M and ways to improve their traction qualities]. – Voroshilovgrad, 1986. – 11 p.

18. Fomin O.V. Analiz dotsilnosti zastosuvannya shestyhrannykh porozhnystykh profiliv v yakosti skladovykh elementiv nesuchykh system napivvahoniv [Analysis of the appropriateness of the use of hexagonal hollow profiles as components of the bearing systems of gondola cars] // *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazariana, Nauka ta prohres transportu*, 2014, № 6 (54), pp. 146-153.

19. Fomin O.V., Gostra A.V. Variacijne opisannya konstruktivnih vikonan' vantazhnykh vagoniv [Variations describe the structural designs of freight cars] // *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series «Transport systems and technologies»*. – Kyiv: DETUT, 2015, Vyp.26-27 – pp. 137-147.

20. Gorbunov N.I. *Povyshenie tyagovyih kachestv teplovozov za schet usovershenstvovaniya uprugih svyazey telezhek* Cand. Diss. [Improving the traction qualities of the locomotive by improving elastic ties carts Cand. Diss.]. – Dnepropetrovsk, 1987. – 180 p.

21. Kovtanets M.V. *Uluchshenie stsepynykh harakteristik lokomotiva struyno-abrazivnym vozdeystviem na zonu kontakta dvizhushchego kolesa s relsom* Cand. Diss. [Improvement of the adhesion characteristics of the locomotive jet abrasive effect on the contact zone of the driving wheel and the rail Cand. Diss.] – Severodonetsk, 2015. – 206 p.

22. Gorbunov M., Pistek V., Kovtanets M., Nozhenko O., Kara S., Kučera P. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / *JVE International LTD. Vibroengineering Procedia*, Sep 2017, Vol. 13, ISSN 2345-0533, pp. 159-164.

23. Gerlici J., Gorgunov M., Kravchenko K., Domin R., Kovtanets M., Lack T. Slipping and skidding occurrence probability decreasing by means of the friction controlling in the wheel-braking pad and wheel-rail contacts / *Manufacturing Technology*, April 2017, Vol. 17, № 2, pp. 179-186.

М. І. Горбунов, д.т.н., професор

(завідувач кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля)

М. В. Ковтанець, к.т.н.

(доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля)

Є. С. Ноженко, к.т.н., доцент

(докторант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля)

О. В. Просвірова,

(ст. викладач кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля)

АНАЛІЗ І РОЗРОБКА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗЧІПНИХ ЯКОСТЕЙ ЛОКОМОТИВІВ

Постійне зростання секційної та осьової потужності сучасних локомотивів гостро висувують проблему вдосконалення їх тягових якостей, поліпшення використання потужності для тяги. У статті проведено огляд та аналіз наявних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на поліпшення тягових та динамічних характеристик локомотивів.

На підставі вивченої інформації авторами сформульовані такі завдання подальших досліджень для підвищення і стабілізації тягово-зчїпних якостей локомотива: розробка способу підвищення тягових якостей тепловоза на основі врахування ступеня зміни граничних по зчепленню можливостей кожної колісної пари екіпажу під дією різних факторів і його реалізація в конструкції локомотива шляхом навмисної

зміни навантажень колісних пар на рейки для вирівнювання максимальних сил зчеплення на всіх колісних парах; отримання кількісних характеристик впливу динамічних факторів на тягові можливості кожної колісної пари і локомотива в цілому; дослідження впливу першого і другого ступеня ресорного підвищення на динамічні і тягові якості локомотива; створення дослідження технічних рішень для поліпшення динамічних і тягових якостей локомотива; створення стендового обладнання і вимірювальних пристроїв для експериментального дослідження характеристик дослідних вузлів.

Ключові слова: тепловоз, колісні пари, коефіцієнт зчеплення, динаміка, тягові якості, розвіска.

*Nikolai I. Gorbunov, Doctor of Science (Technical Sciences), Professor
(Head of faculty of a railway, motor transport and hoisting-and-transport machines
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University)*

*Maxim V. Kovtanets, PhD (Technical Sciences)
(Associate Professor of faculty of a railway, motor transport and hoisting-and-transport machines Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University)*

*Elena S. Nozhenko, PhD (Technical Sciences), Associate Professor
(Doctoral candidate of faculty of a railway, motor transport and hoisting-and-transport machines Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University)*

*Olga V. Prosvirova
(Senior lecturer of faculty of a railway, motor transport and hoisting-and-transport machines Volodymyr Dahl East Ukrainian National University Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University)*

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF WAYS TO IMPROVE ADHESIVE QUALITIES OF LOCOMOTIVES

The constant growth of sectional and axial power in modern locomotives brings the problem of improvement of their traction qualities and improvement of power use for traction with new urgency. The article gives a review and analysis of existing theoretical and experimental studies to improve traction and dynamic characteristics of the locomotive.

Based on the research information, the authors have formulated the following tasks for further research to improve and stabilize the traction qualities of the locomotive: development of a method for improving the traction qualities of the locomotive on the basis of the degree of adhesion limit change capabilities of each wheel pair of the locomotive under the influence of various factors and its implementation in the locomotive design by a deliberate change of wheelset loads on the rails to align the maximum of the adhesion forces on all wheel pairs; obtaining quantitative characteristics of dynamic factors influence on the towing abilities of each of the pair of wheels and the locomotive as a whole; the study of the first and second stage spring suspension influence on the locomotive dynamic and driving characteristics; creating technical solutions to improve the dynamic and traction qualities of the locomotive, creation of stand equipment and measuring devices for experimental research characteristics of experimental sites.

Keywords: locomotive, wheel pair, the coefficient of adhesion, dynamics, traction quality, hanging.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2017 р.