

УДК 625.1

*Т. А. Попова, Г. И. Петров***МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА¹**

Аннотация. В основе свойств качества любой системы, в том числе железнодорожной, лежит неидеальность объектов и процессов: дефекты и деградационные процессы исходных материалов и комплектующих изделий, ошибки проектирования, производства, эксплуатации, ограниченная точность и надежность технологического, испытательного, контрольно-измерительного оборудования. В связи с повышенными требованиями к безопасности обеспечения перевозок, крайне актуальными являются вопросы обеспечения надежности эксплуатации железнодорожного транспорта. В данной работе поднят вопрос обеспечения устойчивости вагона с подробным исследованием применяемых опорных узлов – скользунов железнодорожных тележек.

Ключевые слова: вагон, тележка, скользуны, опорные системы, безопасность, устойчивость.

Для цитирования: Попова, Т. А. Многокритериальный подход к определению устойчивости подвижного состава / Т. А. Попова, Г. И. Петров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 117 – 125.

На основе анализа развития железнодорожного транспорта можно сделать вывод, что его инфраструктура растет и усложняется с каждым годом. Все направлено на повышение качества и безопасности перевозок.

С каждым новым днем железнодорожный транспорт расширяет свою инфраструктуру, ставя перед собой задачу совершенствования качества и безопасности перевозок. Новые технологии и стандарты делают железнодорожное сообщение более надежным и эффективным.

Однако даже современные достижения не исключают проблемы в области безопасности. Вопросы взаимосвязи между устойчивостью вагонов и опорных элементов ходовых частей остаются актуальными и требуют дальнейших исследований.

Анализ развития железнодорожного транспорта показывает, что ключевую роль в обеспечении безопасности играют конструктивные особенности узлов сочленения тележек и кузовов вагонов. Внедрение новых технологий и строгие стандарты помогают улучшить работу системы. Одним из определяющих факторов является конструктивные особенности исполнения узлов сочленения тележек и кузовов вагонов. В наиболее распространенной конфигурации кузов вагона установлен на надрессорные балки двух тележек, обычная «трехсоставная» тележка железнодорожного вагона содержит две колесные пары в сборе с буксовыми узлами, параллельно расположенные боковые рамы, установленные на буксах через адаптеры и соединенные через рессорный комплект с надрессорной балкой, при этом тележка железнодорожного вагона бывает двух типов исполнения: с зазорными скользунами (например, модель тележки 18-100) и беззазорными скользунами постоянного контакта. Стандартное сочленение каждой надрессорной балки и кузова вагона обеспечивает поворот кузова вагона относительно чаши подпятника в центре надрессорной балки.

Для обеспечения плавности перемещения кузова вагона относительно тележки необходимо учитывать не только наклон вагонов, но и разнообразные колебания, которые могут быть вызваны несовершенством геометрии рельсов и колес. Подходящая конструкция опорных элементов должна быть спроектирована таким образом, чтобы эффективно работать при различных частотах воздействий, особенно низких.

При исполнении тележек с безззорной установкой скользунов используются опорные скользуны постоянного контакта, которые за счет сил трения вступают в зацепление с кузовом вагоном. Скользуны необходимы для устранения крена кузова вагона, а также для снижения маятниковых колебаний боковых рам, называемых забеганием. Для улучшения параметров на опорные скользуны устанавливаются колпаки из износостойких материалов, которые, помимо всего прочего, гасят ударные воздействия. Данный элемент предпочтителен в упругом исполнении и оснащен дополнительными пружинящими элементами. [1]

Стандартное сочленение каждой надрессорной балки и кузова вагона играет важную роль в повороте кузова вагона относительно чаши подпятника в центре надрессорной балки. Этот механизм обеспечивает необходимую гибкость и плавность движения вагона по рельсам.

Для достижения лучших результатов в работе опорных элементов желательно провести тщательный анализ условий использования вагонов и основных причин колебаний. Это позволит выбрать оптимальную конструкцию и материалы для опорных ходовых частей, способствуя более эффективной работе и долговечности вагонов в системе железнодорожного транспорта.

В работе [3] поднимается вопрос безопасной эксплуатации в зависимости от опорных элементов. Отмечается, что значительное влияние на процесс движения вагона оказывают различия в упругих характеристиках пружинных комплектов и значениях зазоров в скользунах и буксовых проемах. Согласно исследованию [2], использование упругих скользунов на тележках ведет к перераспределению вертикальных нагрузок от кузова и значительному улучшению динамических качеств четырехосного вагона в горизонтальном направлении. Однако эксперименты показали, что введение демпфирующего момента между кузовом и тележкой не сказывается на величинах горизонтальных сил в кривых.

Исследование [3] также выявляет, что безопасность передвижения вагона напрямую зависит от особенностей опорных элементов. Параметры скользунов и пружинных комплектов играют ключевую роль в обеспечении стабильности и безопасности движения. Кроме того, подробное исследование [2] подчеркивает, что динамические характеристики вагона существенно улучшаются при использовании определенных конструктивных решений по установке упругих скользунов, что повышает эффективность его движения в горизонтальной плоскости.

При интенсивной эксплуатации вагонов, особенно когда речь идет о короткой базе и предрасположенности кузова к перекосам, важную роль играют изменения зазоров по диагонали вагонной рамы. Эти изменения вызваны различными факторами, такими как силы трения в различных узлах вагона. Например, силы, воздействующие на контактирующие поверхности между "пятником - подпятником", а также на наклонные поверхности карманов надрессорной балки, фрикционные клинья и планки.

Рисунок 1 демонстрирует схему действия сил при кососимметричном нагружении вагона, что позволяет более наглядно представить процессы, происходящие внутри вагонной конструкции.

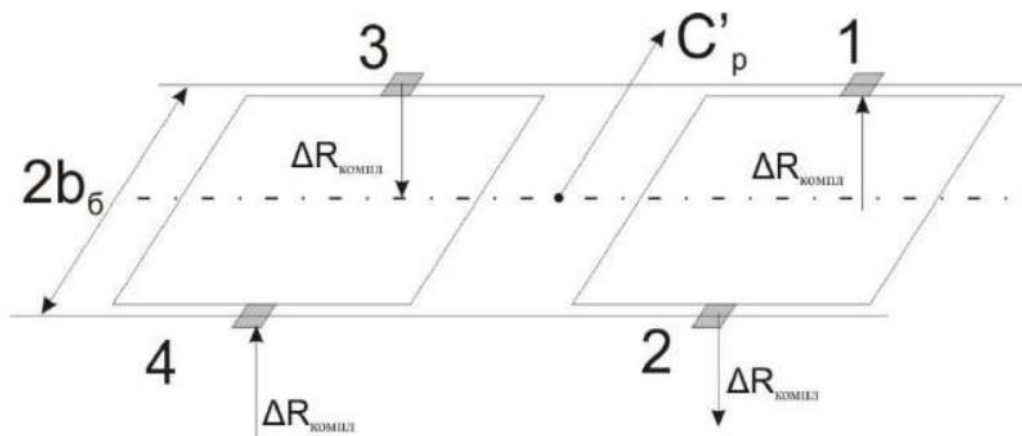


Рис. 1. Схема действия сил при кососимметричном нагружении вагона

Одной из проблем, с которой часто сталкиваются владельцы вагонов, является замыкание регламентированных зазоров в скользунах. Это может привести к серьезным последствиям, поэтому важно регулярно проводить техническое обслуживание и контроль за состоянием вагонов.

Процесс движения железнодорожных вагонов на криволинейных участках пути связан с различными ограничениями, в том числе зазорами в скользунах. Эти зазоры, ограничивающие наклон кузова вагона по диагонали, могут значительно различаться между собой, достигая разницы в 10-11 мм. В результате вагоны могут отклоняться наружу или внутрь кривой при движении, что вызывает кососимметричное нагружение.

Существует явление, при котором большой зазор в скользуне позволяет кузову вагона свободно наклоняться без нагрузки на пружины подвешивания. Однако, даже небольшие расхождения в зазорах могут оказать существенное влияние на движение и нагружение вагонов на кривых участках пути. Решение этой проблемы требует точной настройки и обслуживания скользунов для обеспечения оптимального функционирования вагонов.

Изучение влияния зазоров в скользунах на работу пружин упругого подвешивания тележки позволяет понять, что даже минимальные дефекты могут привести к серьезным последствиям. Как только механизм начинает двигаться по пути, пружины немедленно сжимаются, реагируя на кривизну оборудования. Этот процесс разгрузки и нагрузки колесных пар несет в себе важные последствия. При этом степень сжатия пружин зависит от характеристик пути и может привести к серьезным сдвигам в динамике движения.

Увеличение зазоров в скользунах сопровождается увеличением силы упругой отдачи, что может значительно изменить распределение нагрузки на колесные пары тележки. Как только зазоры достигают значений свыше 7 мм, риск поломки внутренних пружин увеличивается. Это происходит из-за превышения напряжений в пружинах допустимых значений, что создает опасность для нормального функционирования механизма. Важно уделить внимание контролю и обслуживанию скользунов, чтобы избежать возможных повреждений и обеспечить безопасность в процессе работы.

Необходимо всегда помнить, что большая разница величин зазоров в скользунах может серьезно повлиять на поведение тележки во время движения по кривым участкам пути. Это может привести к переходу от положения свободной установки к положению наибольшего перекоса, что, в свою очередь, существенно изменит работу колес. В таких ситуациях значения поперечных направляющих усилий, учитывающих зазоры в скользунах, могут увеличиться на 4-10%, что вызовет разгрузку колес и их последующее всползание на рельсы.

В рамках рационального выбора технических параметров для железнодорожных вагонов еще важнее становится учет норм и стандартов, касающихся узлов и систем. Особое значение приобретают коэффициенты, определяющие безопасность эксплуатации данных

транспортных средств. Именно они помогают предотвратить нежелательные сдвиги и повреждения на пути, обеспечивая стабильность и надежность работы вагонов.

Важно отметить, что безопасность движения железнодорожного состава напрямую зависит от состояния его ходовых частей. Существующие методики оценки схода с рельсов ситуации не всегда могут полностью учесть все возможные факторы риска. Кроме того, отклонения в техническом состоянии нескольких деталей могут оказать значительное влияние на общую прочность системы.

В процессе эксплуатации железнодорожных вагонов нормируемые показатели износа каждого узла играют важную роль. Тем не менее, возможны ситуации, когда накопление отклонений в работе деталей приводит к снижению общего запаса прочности и безопасности. Для улучшения контроля над техническим состоянием вагонов необходимо разработать комплексную систему оценки влияния состояния деталей на износ и безопасность вагонов.

Поэтому одним из ключевых направлений развития в данной области является создание инновационных подходов к оценке ходовых частей и деталей железнодорожных вагонов. Новые методики должны учитывать не только отдельные параметры, но и комплексное взаимодействие всех элементов системы колесо-рельс для обеспечения безопасности движения и продления срока службы оборудования.

Существует множество факторов, которые влияют на устойчивость движения подвижного состава, помимо технического состояния его элементов. Важно учитывать динамические силы взаимодействия, которые могут быть вызваны различными факторами, такими как неровности на поверхности катания, конусность поверхности колес и кривизна пути. В результате возникают дополнительные колебания, которые нужно принимать во внимание.

В работе [4] было установлено, что существует закономерность между изменениями параметров ходовых частей тележки и кузова вагона и устойчивостью движения подвижного состава. Это исследование делает упор на анализ степени демпфирования форм колебаний, уровень подвешивания, а также силовые характеристики связей пятник-подпятник и боковых скользунов. Важно учитывать все эти аспекты для обеспечения безопасности и эффективности работы подвижного состава на железнодорожном транспорте.

Важно отметить, что при боковой качке кузова порожнего вагона требуется, чтобы вертикальная жесткость скользуна составляла не менее 2,5 МН/м. Этот параметр существенно влияет на общую устойчивость поезда во время движения.

При проведении анализа устойчивости учитываются различные факторы, такие как условие поднятия колеса над головкой рельса, искривление рельса и изменение ширины колеи. Необходимо также учитывать соотношение боковых и вертикальных сил, действующих на колесо [5].

Один из ключевых моментов в данном контексте - это определение критического значения соотношения $\frac{P_6}{P_B}$, для чего используется специальная формула Надаля. Это позволяет оценить степень безопасности и надежности поезда на кривых участках пути, обеспечивая высокий уровень проходимости и комфорта для пассажиров. Важно строго контролировать коэффициенты запаса устойчивости, чтобы обеспечить безопасность и эффективность движения по железной дороге.

$$\frac{P_6}{P_B} \leq [K_{BK}] \quad (1)$$

где P_6 – сила давления рамы на направляющую колесную пару (рамная сила);
 P_B – вертикальная сила, действующая на шейку у набегающего колеса;
 $[K_{BK}]$ – допустимая величина коэффициента устойчивости по вкатыванию.

Более подробная информация о методике определения коэффициента запаса устойчивости колеса от вкатывания на рельс представлена в работе [6]:

$$K_{yc} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_B}{P_6} \geq [K_{yc}], \quad (2)$$

где β – угол наклона образующей конусообразной поверхности гребня колеса с горизонталью. Для новых колес с профилем по ГОСТ 9036-88 $\beta = 60^\circ$;

μ – коэффициент трения поверхностей колес и рельсов;

P_B – вертикальная нагрузка от набегающего колеса;

P_6 – боковое усилие взаимодействия гребня набегающего колеса и головки рельса;

$[K_{yc}]$ – допускаемое значение коэффициента запаса устойчивости

Изучение и анализ этих формул позволят рассчитать необходимые параметры для обеспечения безопасности и эффективности движения колесного транспорта, а также оптимизировать процесс регулирования устойчивости при взаимодействии с рельсами. Важно учитывать все факторы, влияющие на устойчивость колеса, для повышения надежности и снижения риска возможных аварийных ситуаций.

Для обеспечения устойчивости грузовых вагонов используется допускаемое значение коэффициента запаса устойчивости $K_{yc} = 1.3$. В расчетах учитываются варианты с одноточным и двухточечным контактом.

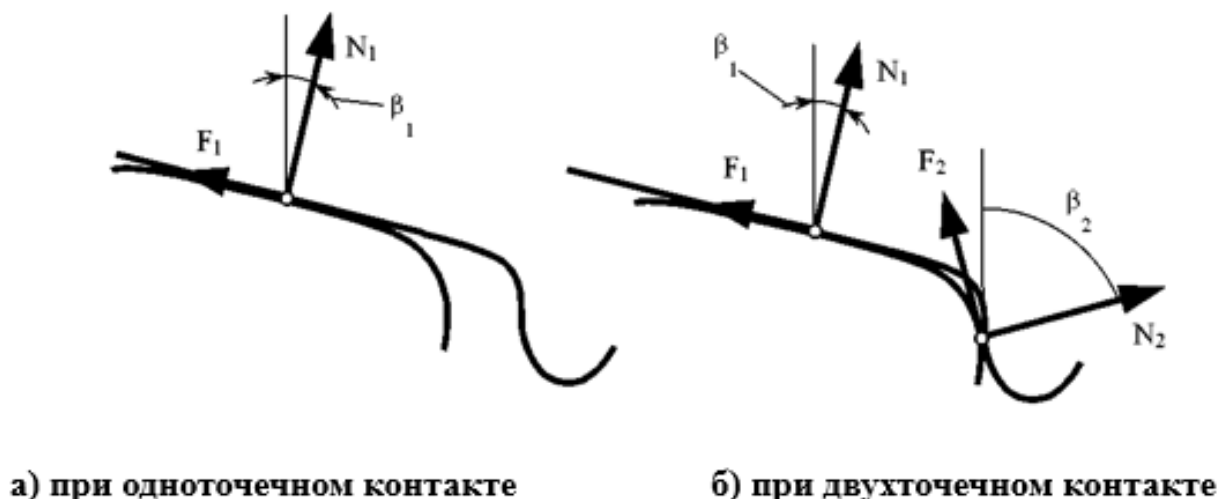


Рис. 2. Силы, действующие на колесо вагонной тележки

Необходимо выделить силы, действующие на колесо вагонной тележки, для случая одноточного контакта. Для одноточного контакта

$$\begin{aligned} P_6 &= F_1 \cdot \cos(\beta_1) - N_1 \cdot \sin(\beta_1); \\ P_B &= N_1 \cdot \cos(\beta_1) + F_1 \cdot \sin(\beta_1) \end{aligned}$$

Для двухточечного контакта

$$\begin{aligned} P_6 &= -N_1 \cdot \sin(\beta_1) - N_2 \cdot \sin(\beta_2) + F_2 \cdot \sin(\beta_2) + F_1 \cos(\beta_1); \\ P_B &= N_1 \cdot \cos(\beta_1) + N_2 \cdot \cos(\beta_2) + F_2 \cdot \sin(\beta_2) + F_1 \cdot \sin(\beta_1) \end{aligned}$$

Железнодорожный путь и подвижной состав представляют собой единую систему, где важно учитывать, как вертикальные, так и горизонтальные силы, вступающие в игру при взаимодействии. Снижение сил динамического взаимодействия может быть достигнуто совершенствованием ходовых частей и пути, а также улучшением технического содержания

их в эксплуатации [5]. Поэтому необходимо учитывать такие физические параметры как продольная жесткость и моменты трения при повороте тележки под вагоном.

Кроме того, для оптимизации работы железнодорожной системы необходимо уделить внимание физическим характеристикам, таким как продольная жесткость и моменты трения при повороте тележки под вагоном. Путем улучшения этих параметров можно добиться существенного снижения динамических сил, действующих на вагоны и путь, что в свою очередь повысит безопасность и эффективность железнодорожного транспорта.

При работе опорных элементов возможно определить силы взаимодействия на скользунах при их замыкании. Особенно важным является анализ математической модели опирания пятниками на подпятники тележки при различных зазорах между скользунами. Подход, представленный в работе [7], позволяет учесть все детали процесса.

Процесс колебаний обладает уникальной чертой – зазоры в скользунах могут закрываться в различных сочетаниях, отражая динамику взаимодействия элементов. Важно учитывать, что общее число таких сочетаний достигает девяти вариантов. Это подчеркивает сложность и Текущие значения зазоров на всех четырех скользунах могут быть определены через координаты следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \xi_{ck1} &= \delta_{ckH1} - \theta B_1 + \theta_{B1} B_1; \\ \xi_{ck2} &= \delta_{ckH2} + \theta B_2 - \theta_{B1} B_2; \\ \xi_{ck3} &= \delta_{ckH3} - \theta B_3 + \theta_{B2} B_3; \\ \xi_{ck4} &= \delta_{ckH4} + \theta B_4 - \theta_{B2} B_4, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где δ_{ckHj} – номинальные значения зазоров в скользунах;
 B_j – расстояние от центра шкворня до середины скользуна;
 $j = 1, 2, 3, 4$ – номер скользуна.

В уравнениях (3) представлены выражения для вычисления текущих значений зазоров ξ_{ckj} . Следует отметить, что замыкание скользунов происходит в случае, когда значение зазора становится равным или меньше нуля. Таким образом, необходимо учитывать неравенство

$$\xi_{ckj} \leq 0. \quad (4)$$

Для определения сил взаимодействия в скользунах при их замыкании предложена следующая модель удара. Предполагается, что вторая производная от ξ_{ckj} в момент удара, когда выполняется неравенство (4), скачком обращается в нуль, т.е.

$$\ddot{\xi}_{ckj} = 0.$$

Изучение взаимосвязей между номинальными значениями зазоров, расстоянием до центра шкворня и условиями замыкания скользунов позволяет эффективно оптимизировать процессы работы механизма и обеспечивать его надежную работу в различных условиях эксплуатации.

Подробное изучение допустимых величин суммарного зазора в скользунах вагонных тележек модели 18-100 серийных цистерн было проведено в работе [5]. В результате исследования было выявлено, что отсутствие зазоров в скользунах тележек вдоль диагонали вагона недопустимо. Одновременно было установлено, что удельная работа сил трения в скользунах практически не меняется в зависимости от величины зазора.

У восьмиосных вагонов необходимо соблюдать определенные зазоры между скользунами различных балок. В частности, суммарный зазор между соединительной и шкворневой балками с обеих сторон одного конца цистерны должен составлять от 4 до 15 мм. Это требование является обязательным для обеспечения безопасности и надежности транспортировки грузов. Дополнительно, необходимо учитывать, что между соединительной

и надрессорной балками с обеих сторон одной двухосной тележки должен быть зазор от 4 до 20 мм. Эти параметры имеют значение для правильного функционирования транспортного средства и предотвращения аварийных ситуаций.

Отсутствие зазоров не допускается в различных ситуациях, например, в двух любых скользунах одной четырехосной тележки с одной стороны цистерны. Также следует учитывать соблюдение зазоров по диагонали цистерны между скользунами соединительной и шкворневой балок, а также между скользунами надрессорной и соединительной балок четырехосной тележки. Эти меры предусмотрены для создания безопасной и эффективной системы грузоперевозок.

На основании статистических данных исследования динамики колесных вагонов и рельсов, анализ динамических параметров взаимодействия колес вагонов и рельсов охватывает множество аспектов, таких как углы набегания колес на головку рельса, рамные силы, боковые силы и коэффициенты вертикальной динамики. Необходимость учета всех этих параметров подчеркивает сложность процесса обеспечения безопасности и эффективности движения по железнодорожным путям.

Зависимость коэффициента демпфирования боковой качки от вертикальной жесткости скользуна представлена на рисунке 3. Этот график является ключевым инструментом в изучении влияния вертикальной жесткости на динамику взаимодействия колес и рельсов. Понимание этой взаимосвязи позволяет оптимизировать процессы поддержания стабильности движения и предотвращения аварийных ситуаций.

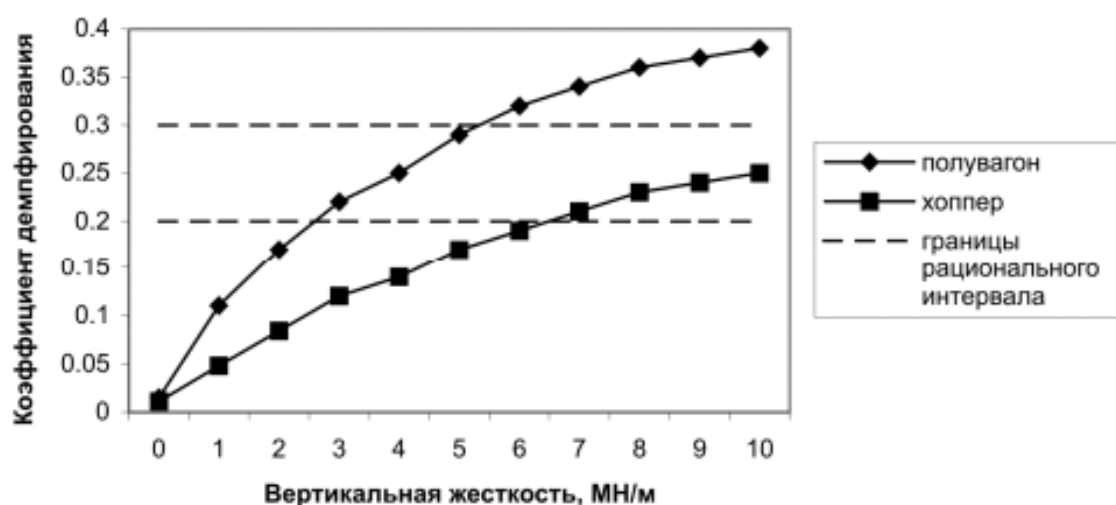


Рис. 3. Зависимость коэффициента демпфирования боковой качки от вертикальной жесткости скользуна

Подробный анализ данных, полученных на примере тележек вагонов модели 18-100, показывает, что оптимальный диапазон суммарного зазора в скользунах составляет от 4 до 14 мм. Важно отметить, что наличие суммарных зазоров в заданных пределах существенно влияет на рамные и боковые силы, возникающие в результате действия неровностей путевого полотна. Эти параметры имеют прямое влияние на безопасность и комфортность движения по железнодорожным путям, и их контроль необходим для обеспечения эффективной эксплуатации железнодорожного транспорта.

Безусловно, важно понимать, что устойчивость вагонов - это комплексный вопрос, который требует глубокого изучения. В ходе анализа различных исследований становится очевидным, что успешное решение этой проблемы зависит от множества факторов. Для достижения оптимальных результатов необходимо учитывать, как технические аспекты, так и внешние условия, оказывающие влияние на устойчивость вагонов.

Кроме того, значительное внимание стоит уделить анализу возможных инновационных подходов к улучшению устойчивости вагонов. Новейшие технологии и современные методы тестирования могут сыграть ключевую роль в повышении безопасности и эффективности использования железнодорожного транспорта. Важно также учитывать специфику различных типов вагонов и их назначение при разработке инженерных решений для повышения устойчивости. Иными словами, исследование устойчивости вагонов требует не только тщательного анализа существующих данных, но и новаторского подхода к поиску оптимальных решений. Взаимодействие технических и внешних факторов, а также постоянное стремление к совершенствованию играют ключевую роль в развитии этой области.

Библиографический список

1. **Сергеевич, Н. И.** Боковая опора кузова на тележку рельсового транспортного средства. Патент RU 2782745». 2022.
2. **Вериго М. Ф., Грачева Л. О., Ромен Ю. С.** Влияние момента трения между кузовом и тележкой на движение грузового вагона в рельсовой колее.-Тр. ЦНИИ МПС, вып.347. 1967.—с. 54-57.
3. **Капустина Е. П., Леоненко Е. Г.** Влияние технических характеристик и их отклонений на устойчивость движения порожнего подвижного состава // Известия Транссиба. 2019. №2 (38).
4. **Орлова, А. М.** Влияние конструктивных схем и параметров тележек на устойчивость, ходовые качества и нагруженность грузовых вагонов: автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н.. Санкт-Петербург, 2008
5. **Иванов, Д. В.** Влияние технического состояния ходовых частей грузовых вагонов на безопасность движения и износ в системе колесо-рельс. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2010.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996
7. **Игембаев, Н. К.** Пути улучшения динамических качеств длиннобазных грузовых вагонов: автореферат диссертации канд. техн. наук / Московский государственный университет путей сообщения. – М., 2010. – 24 с».

T. A. Popova, G. I. Petrov

MULTI-CRITERIA APPROACH TO DETERMINING THE STABILITY OF ROLLING STOCK

Abstract. The quality properties of any system, including railway, are based on the imperfection of objects and processes: defects and degradation processes of raw materials and components, design, production, operation errors, limited accuracy and reliability of technological, testing, control and measuring equipment. Due to the increased requirements for the safety of transportation, the issues of ensuring the reliability of railway transport operation are extremely relevant. In this paper, the issue of ensuring the stability of the car is raised with a detailed study of the support units used – sliding rail carts.

Keywords: wagon, trolley, sliders, support systems, safety, stability.

For citation: Popova, T. A. Multi-Criteria Approach to Determining the Stability of Rolling Stock / T. A. Popova, G. I. Petrov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. – 2025. – № 1. – P. 117– 125.

Сведения об авторах

Попова Татьяна Александровна
Российский университет транспорта (РУТ),
кафедра «Технологии транспортного
машиностроения и ремонт подвижного
состава»,
старший преподаватель,
e-mail: tatiana241187@gmail.com

Петров Геннадий Иванович
Российский университет транспорта (РУТ),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: petrovgi@gmail.com

Information about the authors

Popova Tatiana Alexandrovna
Russian University of Transport (RUT),
Chair «Transport Engineering Technologies
and Rolling Stock Repair»,
Senior Lecturer,
e-mail: tatiana241187@gmail.com

Petrov Gennady Ivanovich
Russian University of Transport (RUT),
Chair «Cars and Car Economy»,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: petrovgi@gmail.com