

Е.А. Рожкова¹, А.Н. Астафьева¹, Т.А. Баранова¹

¹ Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВАГОНА ОТ ОПРОКИДЫВАНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ РАЗЛИЧНОГО РАДИУСА

Аннотация. В работе выполнен анализ движения вагона в кривых различного радиуса, для оценки опрокидывания вагона наружу кривого участка пути. На вагон, движущийся по кривой со скоростью V , действует горизонтальная центробежная сила H_c , которая направлена наружу кривой. Она способствует опрокидыванию вагона, вызывает неприятные ощущения у пассажиров и перегружает наружный рельс, может стать причиной смещения перевозимых грузов. Для предотвращения опрокидывания вагона в данных кривых были выполнены необходимые расчёты коэффициента устойчивости вагона против опрокидывания. По результатам расчетов даны рекомендации по необходимому возвышению наружного рельса для различных радиусов кривых участков пути, а также ограничения скорости при движении вагона.

Ключевые слова: вагон, опрокидывание, центробежная сила, коэффициент устойчивости, кривой участок пути.

Е.А. Rozhkova¹, А.Н. Astafieva¹, Т.А. Baranova¹

¹ Transbaikal Railway Transport Institute, Chita, Russian Federation

ANALYSIS OF STABILITY OF CAR AGAINST ROLLOVER DURING MOVEMENT IN CURVED SECTIONS OF TRACK OF DIFFERENT RADIUS

Abstract. Analysis of car motion in curves of different radius is performed in order to estimate car tipping outside of curved section of track. The car moving along the curve at speed V is subjected to a horizontal centrifugal force H_c which is directed outward of the curve. It contributes to the rollover of the car, causes unpleasant feelings among passengers and overloads the outer rail, can cause displacement of the goods carried. In order to prevent rollover of the car, the necessary calculations of the stability coefficient of the car against rollover were made in these curves. Based on the results of the calculations, recommendations are given on the necessary elevation of the outer rail for different radii of the curved sections of the track, as well as speed limitation during the car movement.

Keywords: car, rollover, centrifugal force, stability factor, curved track section.

Введение.

Железнодорожный путь состоит из чередующихся прямых и кривых участков. Когда вагон движется по кривому участку пути, на него действует центробежная сила, которая при неблагоприятном сочетании с ветровой нагрузкой и поперечными инерционными силами от боковых колебаний кузова на рессорах создает момент, опрокидывающий вагон наружу кривой и разгружающий колёса с внутренней стороны кривой [4, 8].

Для компенсации действия центробежной силы в кривой радиусом R наружный рельс укладывают выше внутреннего. Максимально допустимое возвышение наружного рельса на кривом участке составляет 150 мм.

Величину возвышения h наружного рельса обычно определяют из условия, чтобы вертикальные нагрузки колес на головки обоих рельсов были одинаковыми. Следовательно,

$$\frac{H_c}{mg} = \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{h}{2s}, \quad (1)$$

где H_c – центробежная сила,
 m – масса вагона,
 $2s$ – ширина колеи,
 α – угол возвышения рельса.

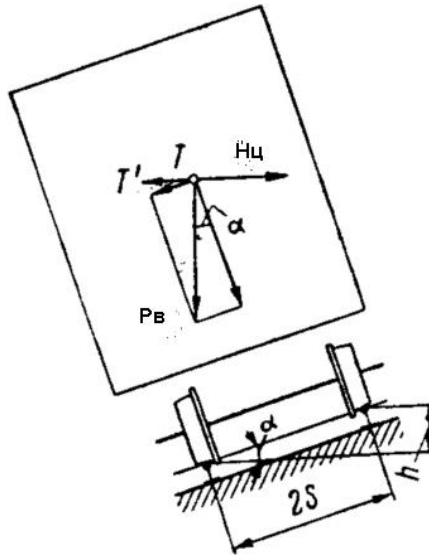


Рис. 1. Силы, действующие на подвижной состав при движении в кривых

Устойчивость вагона против опрокидывания оценивают при его проектировании расчетным путем по условному критерию исходя из соотношения сил взаимодействия колес с рельсами.

Для то чтобы проверить условие устойчивости вагона от опрокидывания вагона наружу кривой необходимо определить центробежную силу и коэффициент устойчивости вагона. Расчет производится для порожнего режима, так как порожний вагон менее устойчив.

Общий алгоритм расчета коэффициента устойчивости против опрокидывания наружу кривой.

Определение центробежной силы, приложенной к кузову вагона порожнего режима, определяется по формуле 2 [4-6]

$$H_{цк.порож}(v) = \frac{T_k}{g} \cdot \left(\frac{v^2}{R} - \frac{h}{2S} \cdot g \right), \quad (2)$$

где $v = 15.33$ – скорость движения вагона, м/с;

$h = 0,15$ – возвышение наружного рельса в кривой, м.

Определение ветровой нагрузки, приложенной к кузову, Н.

Определение высоты точки приложенной равнодействующей ветровой и центробежной нагрузок над уровнем головки рельса, для порожнего режима, м

$$h_{рд.порож.}(v) := \frac{H_{цк.порож.}(v) \cdot h_{ц.порож.} + H_{ВК} \cdot h_B}{H_{цк.порож.}(v) + H_{ВК}}, \quad (3)$$

где $h_{ц.порож.} := 1.8$ - высота точки приложения центробежной нагрузки над уровнем головки рельса, для порожнего режима, м;

$h_B := 1.98$ - высота точки приложения ветровой нагрузки над уровнем головки рельса, м;

Определим ветровую нагрузку, приложенную к кузову

$$H_{ВК} := F \cdot \omega, \quad (4)$$

где F - площадь боковой проекции кузова, м²;

$\omega := 500$ - удельное ветровое давление, Па.

Определение отношения боковых сил к весу кузова для порожнего режима

$$\mu_{порож.}(v) := \frac{H_{цк.порож.}(v) + H_{ВК}}{T_k}. \quad (5)$$

Определение поперечного смещения центра масс вагона под действием боковых сил, для порожнего режима

$$\Delta_{\text{порож.}}(v) := \frac{\text{порож.}(v) \cdot h_{\text{ц.порож.}}}{\left(\frac{b_2^2}{f_{\text{ст.порож.}} \cdot h_{\text{рд.порож.}}(v)} - 1 \right)}, \quad (6)$$

где $b_2 := \frac{2.036}{2}$ – половина расстояния между серединами шеек оси колесной пары, м.

$$\delta_{\text{порож.}} := \frac{2 \cdot q_{\text{тел.}}}{T_K}, \quad (7)$$

где $r := 0.475$ - радиус колеса вагона

Определение коэффициента устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых

$$K_{\text{ус.порож.}}(v) = \frac{s \cdot (1 + \delta_{\text{порож.}})}{\text{порож.}(v) \cdot [h_{\text{рд.порож.}}(v) + r \cdot (1 + \delta_{\text{порож.}})] + \Delta_{\text{порож.}}(v) + \Delta_{\text{цм}}}. \quad (8)$$

Условие устойчивости:

$$K_{\text{ус.расч}} \geq K_{\text{ус.доп}}$$

$K_{\text{уст.доп.}} := 1.5$ - допускаемое значение коэффициента устойчивости по [5].

Расчет производился для универсальных и специализированных полувагонов [2]. Технические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики полувагонов

Показатель	Универсальные 4-осные полувагоны			Специализированные	
	12-132	12-119	12-196	12-1592	12-197
Грузоподъемность, т	70	69	73,5	71	74,5
Тара, т	24	22,5	26	21,2	25
Объем кузова, м	88	76	96	83	92
База вагона, м	8,65	8,65	8,65	8.65	8,65

Результаты расчетов коэффициента устойчивости представлены в таблицах 2-6.

Таблица 2 – Результаты расчета полувагона модели 12-132

Радиус кривой R, м	Возвышение наружного рельса h, мм	Максимальная скорость V, м/с	Расчетный коэффициент устойчивости вагона	Ограничение по скорости V, м/с
250	150	33	1,013	26
300	150	33	1,191	29
350	150	33	1,36	31
400	150	33	1,523	33
450	120	33	1,58	33
500	90	33	1,609	33
600	30	33	1,604	33
800	0	33	1,757	33
1000	0	33	1,945	33

Таблица 3 – Результаты расчета полувагона модели 12-119

Радиус кривой R, м	Возвышение наружного рельса h, мм	Максимальная скорость V, м/с	Расчетный коэффициент устойчивости вагона	Ограничение по скорости V, м/с
250	150	33	1,022	26
300	150	33	1,196	29

350	150	33	1,361	31
400	150	33	1,519	33
450	120	33	1,573	33
500	90	33	1,601	33
600	30	33	1,596	33
800	0	33	1,742	33
1000	0	33	1,92	33

Таблица 4 – Результаты расчета полувагона модели 12-196

Радиус кривой R, м	Возвышение наружного рельса h, мм	Максимальная скорость V, м/с	Расчетный коэффициент устойчивости вагона	Ограничение по скорости V, м/с
250	150	33	1.003	26
300	150	33	1.183	29
350	150	33	1.358	31
400	150	33	1.527	33
450	120	33	1.586	33
500	90	33	1.616	33
600	30	33	1.611	33
800	0	33	1.771	33
1000	0	33	1.971	33

Таблица 5 – Результаты расчета полувагона модели 12-1592

Радиус кривой R, м	Возвышение наружного рельса h, мм	Максимальная скорость V, м/с	Расчетный коэффициент устойчивости вагона	Ограничение по скорости V, м/с
250	150	33	1.03	26
300	150	33	1.2	29
350	150	33	1.36	30
400	150	33	1.512	33
450	120	33	1.564	33
500	90	33	1.591	33
600	30	33	1.587	33
800	0	33	1.726	33
1000	0	33	1.894	33

Таблица 6 – Результаты расчета полувагона модели 12-197

Радиус кривой R, м	Возвышение наружного рельса h, мм	Максимальная скорость V, м/с	Расчетный коэффициент устойчивости вагона	Ограничение по скорости, V м/с
250	150	33	0,883	26
300	150	33	1,075	28
350	150	33	1,273	30
400	150	33	1,476	32
450	120	33	1,551	33
500	90	33	1,589	33
600	30	33	1,582	33
800	0	33	1,794	33
1000	0	33	2,076	33

Заключение. После анализа исследований можно сделать вывод, что при малых радиусах (250÷400) для данных полувагонов необходимо максимальное допустимое возвышение рельса, так как при меньшем возвышении произойдет опрокидывание

подвижного состава. Также для безопасного движения нужно соблюдать ограничение скорости.

Для данных полувагонов при радиусе кривой $R=250$ м и максимальном возвышении необходимо сделать ограничение скорости до 26 м/с. При радиусе $R=300$ м для полувагона модели 12-197 ограничение скорости будет до 28 м/с, для остальных ограничение скорости до 29 м/с. Для моделей 12-132, 12-119, 12-196 при $R=350$ м и возвышением $h=150$ мм необходимо снизить скорость движения до 31 м/с, для моделей 12-1592 и 12-197 ограничение составит 30 м/с. При движении в радиусе кривой $R=400$ м полувагон 12-197 в порожнем состоянии ограничит скорость до 32 м/с, остальные до 33 м/с.

При дальнейшем увеличении радиуса ($450 \div 1000$) возвышение рельса подбирается так, чтобы движение подвижного состава не было ограничено по скорости и исключена возможность опрокидывания. Для $R=450$ оптимальное значение возвышения будет $h=120$ мм, для $R=500$ оптимальное значение $h=90$ мм, для $R=600$ – $h=30$ мм. Для $R=800$, $R=1000$ возвышение уже не требуется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анисимов П.С., Испытания вагонов. – М.: Маршрут, 2004. – 197 с.
2. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам Введ. – 2016-07-01– М.: Стандартинформ. – 2016. – 54 с.
3. Котуранов В.Н. Нагруженность элементов вагонов. / Котуранов В.Н., Хусидов В.Д., Устич П.А., Быков А.И. // М.: Транспорт, 1991. – 232 с.
4. Лукин В.В., Конструирование и расчет вагонов: учебник / В.В. Лукин, П.С. Анисимов, В.Н. Котуранов и др. // М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2011. – 688 с.
5. Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» – ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – М., 1996. – 319 с
6. Рожкова Е. А. Динамика вагона: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы для студентов очной и заочной форм обучения специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог». – Чита: ЗаБИЖТ, 2019. – 60 с.
7. Соколов А.М. Next generation // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. тр. XI международ. науч.-технич. конф. – СПб: ПГУПС, 2016. – С.11 – 18
8. Шадур Л.А., / Расчет вагонов на прочность / С.В. Вершинский, Е.Н. Никольский, Л.Н. Никольский, А.А. Попов, Л.А. Шадур // М.: Машиностроение, 1971. – 432 с.
9. Шадур Л.А., Вагоны: Конструкция, теория и расчет / Л.А. Шадур, Челноков, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский, П.Г. Проскурнев, В.Н. Котуранов и др.; под ред. Л.А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. –М.: Транспорт.
10. Шпур Г., Краузе Ф. Автоматизированное проектирование в машиностроении / Г. Шпур, Ф. Краузе. // Пер. с нем. Г.Д. Волковой и др.; Под ред. Ю.М. – М.: Мир, 1991. - 648 с
11. Pat Kentner, The Car & Locomotive Cyclopedia / Pat Kentner, Brian Brundige, J. Craig Thorpe, John Winfield, William W. Kratville, Laura J. O'connor // Hardcover, 1136 Pages, Published – 1997.

REFERENCES

1. Anishimov P.S., Car Tests. - M.: Route, 2004. - 197 p.
2. GOST 33211-2014. Freight cars. Requirements to strength and dynamic qualities Introduced. - 2016-07-01- M.: Standard form. - 2016. - 54 p.
3. Koturanov V.N. Loading of elements of cars./Koturanov V.N., Husidov V.D., Ustić P.A., Bykov A.I.//M.: Transport, 1991. - 232 p.
4. Lukin V.V., Design and calculation of cars: textbook/V.V. Lukin, P.S. Anishimov, V.N. Koturanov, etc.//M.: FSOU "Educational and Metadical Center on Education in Railway Transport." - 2011. - 688 p.

5. Standards for Calculation and Design of Cars, Railways of the MPS Gauge 1520 mm (Non-Navigational) "- GosNIIIV - VNIIT. - M., 1996. - 319 s
6. Rozhkova E. A. Dynamics of the Car: Educational and Methodological Manual for Performing Course Work for Students of Face-to-Face and Correspondence Forms of Study Specialty 23.05.03 "Rolling Stock of Railways." - Chita: ZabIIT, 2019. - 60 .
7. Sokolov A.M. Next generation//Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: st. тр. XI международ. науч. - технич. Cont. - SPb: PGUPS, 2016. - С.11 - 18
8. Shadur L.A./Calculation of cars for strength/S.V. Vershinsky, E.N. Nikolsky, L.N. Nikolsky, A.A. Popov, L.A. Shadur//M.: Mechanical Engineering, 1971. - 432 p.
9. Shadur L.A., Cars: Design, theory and calculation/L.A. Shadur, Shutnokov, L.N. Nikolsky, E.N. Nikolsky, P.G. Proskournev, V.N. Koturanov, etc.; Under ed. L.A. Shadura. - 3rd ed., re-work And additional -M: Transport.
10. Spur G., Krause F. Automated Engineering in Mechanical Engineering/G. Spur, F. Krause.//Per. With Mr. G.D. Volkova et al.; Under ed. Yu.M. - M.: Mir, 1991. - 648 s
11. Pat Kentner, The Car & Locomotive Cyclopedia / Pat Kentner, Brian Brundige, J. Craig Thorpe, John Winfield, William W. Kratville, Laura J. O'connor // Hardcover, 1136 Pages, Published – 1997.

Информация об авторах

Рожкова Елена Александровна – к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: helenuys@mail.ru

Астафьева Алина Николаевна – студентка группы ПСЖ.2-17-1, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: alina.astafeva.2018@mail.ru

Баранова Татьяна Андреевна – студентка группы ПСЖ.2-17-1, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: baranova.tanya1@yandex.ru

Authors

Rozhkova Elena Alexandrovna - Associate Professor of Railway Rolling Stock Department, Transbaikal Railway Transport Institute, Chita, e-mail: helenuys@mail.ru

Astafieva Alina Nikolayevna - Student of ПСЖ.2-17-1 Group, Transbaikal Railway Transport Institute, Chita, e-mail: alina.astafeva.2018@mail.ru

Baranova Tatiana Andreevna - student of ПСЖ.2-17-1 group, Transbaikal Railway Transport Institute, Chita, e-mail: baranova.tanya1@yandex.ru

Для цитирования

Рожкова Е.А. Анализ устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых участках пути различного радиуса [Электронный ресурс] / Е.А. Рожкова, А.Н. Астафьева, Т.А. Баранова // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – №2(8). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/28-20>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 16.07.2020)

For citation

Rozhkova E.A. Analysis of stability of car against rollover during movement in curved sections of track of different radius [Electronic resource] / E.A. Rozhkova, A.N. Astafieva, T.A. Baranova // "Young science of Siberia": electron. scientific journal – 2020. – № 2(8). – Access mode: <http://mnv.irgups.ru/toma/28-20>, free. – Zagl. from the screen. – Yaz. Russian, English (date of the application 16.07.2020)