

А. Я. КУЗИШИН, А. В. БАТІГ

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ЩОДО РОЗРАХУНКУ КРИТЕРІЇВ БЕЗПЕКИ РУХУ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

**Предметом** дослідження даної роботи є методи визначення параметрів безпеки від сходу колеса з рейки. **Об'єктом** дослідження є взаємодія колії та рухомого складу. **Метою** даної роботи є дослідження підходів, які застосовують вітчизняні та закордонні вчені, при оцінці безпеки від сходу колеса з рейки. Проаналізувати аналітичні умови вкочування гребеня колеса на головку рейки, які є критеріями безпеки від сходу колеса з рейки при виконанні залізнично-транспортних експертиз. **Методами** дослідження, які використовуються у даній роботі, є: системний, логічний та історичний підходи; аналізу і синтезу, індукції та дедукції; моделювання. **Задачі** статті полягають у такому: здійснити аналіз методів визначення критеріїв безпеки від сходу колеса з рейки; оцінити важливість всіх методів та підходів, виявити їх недоліки і переваги, зробити рекомендації щодо удосконалення методу оцінки стійкості рейкових екіпажів на залізницях України. **Результати.** Проаналізовані праці вітчизняних та закордонних вчених, які присвячені питанню оцінки безпеки від сходу колеса з рейки. Встановлено, що для наближення результатів математичного моделювання рухомого складу до реальних умов експлуатації задачу сходу колісної пари з рейкової колії слід виконувати з використанням динамічних рівнянь просторових коливань. Було запропоновано при визначенні оцінки безпеки від сходу колеса з рейки враховувати аналітичні умови вкочування гребеня колеса на головку рейки, які були запропоновані д. т. н. Соколом Е.М. при проведенні судових залізнично-транспортних експертиз. **Висновки.** Більшість розглянутих методик оцінюють імовірність сходу по одній колісній парі, не враховуючи впливу інших колісних пар, що може призвести до хибних результатів. Встановлено, що для наближення результатів теоретичних розрахунків до експериментальних даних, задачу сходу колеса з рейки слід розв'язувати з використанням рівнянь просторових коливань вагона.

**Ключові слова:** схід колеса; колісна пара; гребень колеса; залізнично-транспортна експертиза; безпека руху.

### Вступ

Здатність залізничного транспорту забезпечувати захист життя пасажирів, збереження вантажів і довкілля в процесі його експлуатації в цілому визначає його розвиток і досягнення ним провідних позицій на ринку перевезень. Найважливішою проблемою на залізничному транспорті є забезпечення безпеки руху рейкових екіпажів, як на етапі проектування, так і в процесі їх експлуатації. При цьому запобігання аваріям і сходам являється першочерговим завданням. Слід зазначити, що рівень безпечної експлуатації рухомого складу на залізницях визначається, в головній мірі, наявністю запасу стійкості рейкового екіпажу. Тому вивченню питання про схід рейкових екіпажів із залізничної колії надається велике значення в багатьох експериментальних і теоретичних дослідженнях.

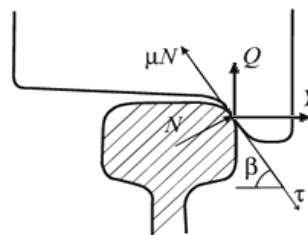
### Виклад основного матеріалу

В теорії Надаля вихідним положенням колеса вважається таке, при якому його поверхня кочення піднялась над головкою рейки, і контактує з рейкою тільки в точці, яка розташована на кінчній частині гребеня. Прийнято, що схід колеса з рейки не відбудеться, якщо співвідношення прикладених до колеса сил – горизонтальної поперечної  $Y$  і вертикальної  $Q$  (при дії максимальної сили сухого тертя  $T = \mu N$ ) буде таким, що гребінь відносно рейки буде ковзати вниз (рис. 1).

Зазначена вище умова виражається наступною нерівністю:

$$Q \sin \beta > Y \cos \beta + \mu(Q \cos \beta + Y \sin \beta), \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $N$  – вертикальна сила від дії колеса на головку рейки;  $\beta$  – кут нахилу твірної гребеня до горизонталі.



**Рис. 1.** Сили, що діють в точці контакту при ковзанні гребеня вниз відносно головки рейки

Із формули (1) випливає, що:

$$\frac{Y}{Q} < \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (2)$$

Нерівність (2) визначає область значень відношення  $Y/Q$ , при яких не відбувається вкочування гребеня колеса на головку рейки.

У задачі Надаля розглядається окремо взяте колесо і не береться до уваги, що в процесі сходу колісна пара котиться по рейках, а не просто видавлюється із колії. Також передбачається, що всі діючі на колесо сили проходять через одну точку, хоча в дійсності це не так. Тому врахування сил взаємодії другого (ненабігаючого) колеса з рейкою призводить

до модифікації умови сходу колеса з рейки.

При додатному куті набігання  $\alpha$  необхідно ввести поправку, прийнявши до уваги коефіцієнт тертя ковзання для ненабігаючого колеса і рейки.

При цьому формула (2) прийме наступний вигляд:

$$\frac{Y}{Q} < \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \beta} - \frac{Q'}{Q} \cdot \mu', \quad (3)$$

де  $Q'$  – навантаження на рейку від ненабігаючого колеса;  $\mu'$  – відповідний коефіцієнт тертя ковзання.

Випадки сходу при від'ємному куті набігання відбуваються частіше з колесами другої колісної пари візка, особливо під час руху у кривих ділянках колії. Умову сходу колеса з рейки в цьому випадку можна отримати, помінявши у виразі (3) знаки  $\mu$  і  $\mu'$ .

Слід зазначити, що коли кут набігання дорівнює нулю, то нерівність (3) приймає вигляд:

$$\frac{Y}{Q} < \operatorname{tg} \beta. \quad (4)$$

Однак дана формула виведена без урахування обертання колеса і тертя реборди об головку рейки, а тому сила тертя повністю використана на переміщення колеса по лінії ковзання.

Подальший розвиток теорії безпеки від сходу колеса з рейки був наведений у роботі [1]. У даній роботі був запропонований метод оцінки стійкості руху проти сходу колеса з рейок за уточненою формулою, яка визначає критичну величину відношення горизонтальної рамної сили і вертикальної сили при даному розподілі вертикальних навантажень на осі однієї і тієї ж колісної пари. Наведена в цих роботах уточнена умова знайшла широке застосування в експериментальних роботах по визначенню гранично допустимих швидкостей руху нових і модернізованих одиниць рухомого складу.

$$\frac{Y_p}{P_1} \leq \frac{P_2}{P_1} \cdot k_1 - k_2 + k_3 \cdot \frac{K}{P_1}, \quad (5)$$

де  $Y_p$  – рамна сила;  $P_1, P_2$  – сили, що діють на колісні пари від надресорної будови екіпажу;  $K$  – половина ваги колісної пари;  $I_1, I_2$  – вертикальні сили інерції колісної пари (рис. 3).

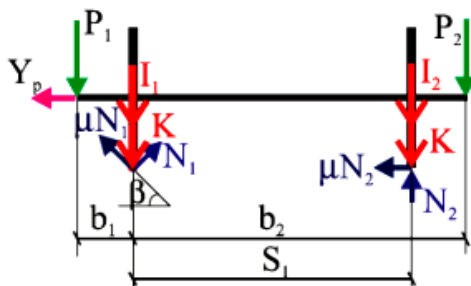


Рис. 3. Схема сил прикладених до колісної пари

Слід зауважити, що це відношення залежить не тільки від  $\mu$  і  $\beta$  але й ще від величини відношень  $\frac{P_2}{P_1}$ ,  $\frac{I_2}{I_1}$ ,  $\frac{I_1}{P_1}$  і  $\frac{K}{P_1}$ . Найбільш небезпечним, як відмічають автори являється випадок коли відношення  $\frac{P_2}{P_1}$  є максимальним.

В роботі [2] формулюється енергетичне трактування вкочування колеса на головку рейки. На думку авторів, це можливо тоді, коли кінетична енергія руху, яка припадає на колісну пару, перевершує ту роботу сил, що виникають в контакті поверхонь гребеня і колеса, яку вони здійснюють при підйомі на висоту гребеня. На думку авторів, запропонована схема оцінки запасу стійкості враховує вплив основних факторів, що спричиняють виникнення аварійного стану.

В роботі [3] автори розробили уточнений метод, де на кожному кроці інтегрування в процесі комп'ютерного моделювання руху рухомого складу відбувається процедура порівняльної оцінки значень трьох коефіцієнтів запасу стійкості, що розраховуються за формулою Мар'є  $k_{ст, Мар'є}$ , по тиску в плямі контакту  $k_{ст,т}$  і по енергетичному співвідношенню  $k_{ст,ен}$ . Після цього вибирається мінімальне значення коефіцієнта стійкості, фіксується його значення і виводиться на графік в якості підсумкового значення у вигляді комбінованого коефіцієнта.

В роботі [4] пропонується метод оцінки достатньої умови стійкості колеса на рейці з урахуванням ймовірного характеру сил, що діють в точці контакті, а також кута набігання колеса на рейку.

Представлена у даній роботі оцінка є достатньою, але не необхідною умовою стійкості колеса на рейці, при виконанні якої ймовірність стійкості буде задалегідь забезпечуватися.

Автор роботи [5] зазначає, що існує декілька критеріїв оцінки стійкості рухомого складу проти сходу колеса з рейок: по зрушенню рейко-шпальної решітки, по вкочуванню гребеня колеса на головку рейки, по опрокидуванню екіпажу, по руйнуванню рейко-шпальної решітки та по руйнуванню рейкової колії.

Практика показує, що зрушення рейко-шпальної решітки не відбувається, якщо відношення рамної сили, що діє на колісну пару екіпажу, до вертикального навантаження на колесо менше 0,4 [6]. При цьому автор пропонує для практичних цілей створити узагальнений критерій стійкості рухомого складу проти сходу колеса з рейок, що відображає допустимий рівень динамічної взаємодії між колесом і рейкою.

В роботі [7] авторами обговорюються деякі логічні суперечності, які стосуються критеріїв вкочування колеса на головку рейки.

Вони вважають, що при логічному підході значення  $Y/Q$  мають визначатися з фактичних геометричних умов сходу колеса з рейки, встановлених в результаті вирішення трьохвимірної нелінійної задачі кочення колеса по рейці. Наприклад, можна вважати, що граничним являється стан системи, коли контакт між гребенем і рейкою відбувається в крайній точці прямолінійної ділянки профілю гребеня колеса.

При цьому задаючи певний коефіцієнт запасу, перейти до визначення відповідного співвідношення  $Y/Q$ .

Численні дослідження щодо проблем безпеки руху були проведені науково-дослідним інститутом залізничного транспорту японських національних залізниць при створенні рухомого складу для нової лінії Токайдо. Серед численних випробувань особлива увага приділялася питанням сходу вагона з рейок.

В роботі [8] порівнюються північноамериканський, британський і європейський підходи щодо оцінки безпеки руху. Автори приходять до висновку, що британські та європейські критерії містять граничні значення сил, які передаються від екіпажу на колію. Північноамериканський підхід не обмежує максимальні сили, що діють на колію, а обмежує статичні навантаження.

У Британському підході є обмеження і на вертикальні, і на горизонтальні сили, а в європейському – тільки на горизонтальні поперечні.

Для динамічного моделювання можливості сходу колісної пари з рейки в роботі [9] пропонується використовувати сучасні програмні пакети. Це дає можливість моделювати рух цілого екіпажу, а не лише окремо взятої колісної пари.

У роботі [10] порівнюються два критерії безпеки від сходу колеса з рейки. Перший – заснований на формулах Надаля, другий – енергетичний. Було відмічено, що енергетичний критерій є зручнішим для моніторингу стану залізничного транспорту, оскільки не потребує вимірювання контактних сил.

У роботі [11] досліджувалися та порівнювалися кінематичний та геометричний критерії безпеки від сходу колеса з рейки.

У роботах [12, 13] були проведені дослідження стосовно модифікації критеріїв сходу, які враховують кут набігання колеса на головку рейки і встановлено, що врахування кута набігання при визначенні можливості сходу колісної пари з рейки підвищує точність розрахунків.

В чинній нормативній літературі [14–17] при оцінці сходу колеса з рейки пропонується використовувати "коефіцієнт запасу стійкості проти вкочування колеса на головку рейки". При цьому вважається, що у випадку, коли значення цього коефіцієнта менше одиниці, колісна пара може зійти з рейок. Однак при виведенні цього критерію не враховувалися багато факторів, в тому числі і такі як кут набігання колісної пари і тривалість дії сил.

У роботах [18, 19] на основі детальної математичної моделі взаємодії колісної пари з

рейковою колією були надані уточнені уявлення про процес сходу колісної пари, але з використанням її спрощеної моделі.

Слід відмітити, що в роботі [20] для визначення умови безпеки від сходу колісної пари з рейки автор пропонує розглядати не схід одного окремо взятого колеса, а колісної пари в цілому, причому приймати її як тверде тіло. При цьому необхідно розглянути можливий рух колісної пари при ковзанні в вертикальній поперечній площині гребеня колеса, яке набігає на головку рейки (рис. 4).

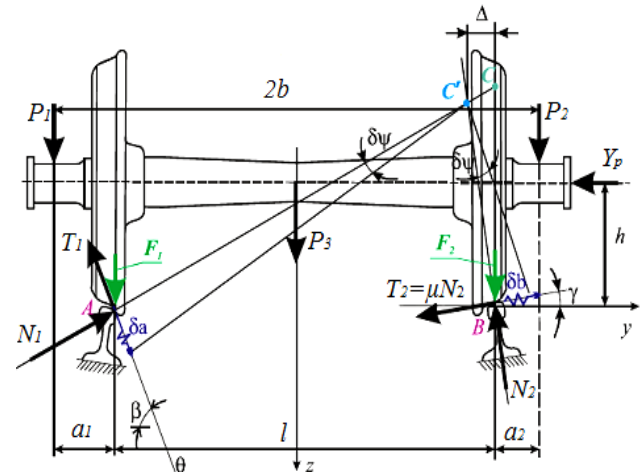


Рис. 4. Схема колісної пари і прикладені навантаження

де  $P_1, P_2$  – динамічні вертикальні навантаження, що діють на шийки осі колісної пари;  $P_3$  – вага не обрешореної частини колісної пари;  $Y_p$  – горизонтальна поперечна – рамна сила, яка діє на колісну пару зі сторони рами візка;  $N_1, N_2$  і  $T_1, T_2$  – відповідно реакції рейок і сили тертя, які передаються від рейок на колеса колісної пари;  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $h$  – висота від рівня головки рейки, на якій прикладена рамна сила;  $\beta$  – кут нахилу твірної конуса гребеня бандажа до горизонталі.

При виборі розрахункової схеми було введено уточнення, яке пов'язане з тим, що реакція ненабігаючого колеса не є вертикальною через нахил поверхні кочення колеса.

Таким чином умова безпеки від сходу колісної пари приймає наступний вигляд:

$$\frac{Y_p}{F_1} < k_1 - k_2 \cdot \frac{F_2}{F_1} - k_3 \cdot \frac{\sum P_i}{F_1}, \quad (6)$$

В даній роботі була отримана оцінка впливу нахилу поверхні кочення колеса, яке не набігає на головку рейки. При цьому точність результату показала, що найбільша похибка склала 6,2%. Тому у розрахунках можна прийняти, що  $\Delta = 0$ .

На основі цього припущення умова безпеки від сходу колісної пари з рейки прийме наступний вигляд:

$$\frac{Y_p}{F_1} < k_1 - k_2 \cdot \frac{F_2}{F_1}, \quad (7)$$

Також в даній роботі був уточнений коефіцієнт запасу стійкості проти вкочування колеса на головку рейки. Автором було прийнято, що інтенсивність ковзання колеса вниз, перш за все, залежить від співвідношення сил, які діють у напрямку ковзання, тобто по напрямку дотичної або просто вздовж по направляючій конічній частині профілю.

При цьому коефіцієнт запасу стійкості проти вкочування колеса на головку рейки має наступний вигляд:

$$K'_y = \frac{\operatorname{tg} \beta}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \beta + \frac{Q}{Y} \cdot \mu} \cdot \frac{Q}{Y} = \lambda_2 \left( \frac{Q}{Y} \right) \cdot \frac{Q}{Y}. \quad (8)$$

Також слід відмітити підходи д.т.н. Сокола Е.М., які використовуються при проведенні судових залізнично-транспортних експертиз [21].

Слід зазначити, що колесо, яке рухається по зовнішній рейці, взаємодіє з рейкою двома точками. Перша – це точка взаємодії поверхонь кочення рейки і бандажа; друга – точка взаємодії поверхні гребеня і бокової робочої грані рейки.

Отже, момент часу, в який реакція рейки в першій точці взаємодії стає рівною нулю, можна розглядати як початок вкочування гребеня колеса на головку рейки (рис. 5).

Рух колісної пари розглядається як складний, також як сукупність поступального руху разом з центром мас і сферичного руху навколо центру мас. Дослідження руху колісної пари проводиться з використанням чотирьох систем координатних осей.

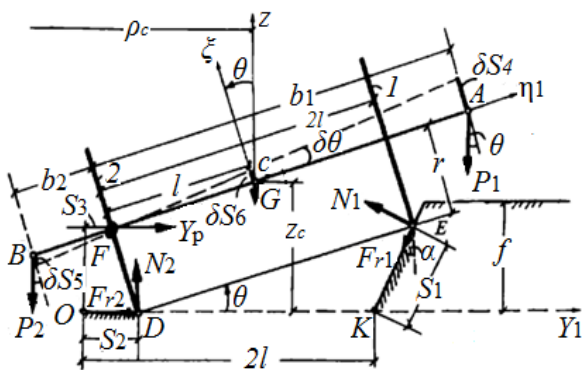


Рис. 5. Рух колісної пари при вкочування колеса на головку рейки

де  $P_1, P_2$  – динамічні навантаження на колеса колісної пари;  $Y_p$  – рамна сила, яка діє на вісь колісної пари;  $G$  – власна вага колісної пари;  $N_1, N_2, F_{r1}, F_{r2}$  – реакції рейкових поверхонь.

Рух колісної пари під дією прикладених до неї сил описується системою диференціальних рівнянь, вирішення яких дозволяє аналітично визначити умови сходу з рейок рухомого складу при вкочуванні гребеня колеса на головку рейки.

Автор даної роботи зазначає, що для вкочування гребеня колеса на головку рейки потрібне виконання як мінімум двох умов: необхідної та достатньої.

Аналітичний вираз необхідної умови вкочування гребеня колеса на головку рейки має вигляд:

$$P_1 < P_1^*, \quad (9)$$

де  $P_1$  – фактичне навантаження на колесо;  $P_1^*$  – навантаження на колесо при якому починається процес вкочування.

$$P_1^* = \frac{Cb_2 + Y_p r - Gl}{b_1 + b_2}, \quad (10)$$

де  $C = (P_1 + P_2)$  – статичне навантаження на вісь колісної пари;  $r$  – радіус колеса;  $G$  – вага колісної пари;  $Y_p$  – рамна сила.

Виконання необхідної умови ще не означає факт сходу рухомого складу, так як колісна пара, здійснюючи рух в показаному на (рис. 5) напрямку відліку кута  $\theta$ , не вкотившись на поверхню кочення головки рейки, може почати рух у зворотному напрямку. Тому потрібно ще перевіряти виконання достатньої умови вкочування колеса колісної пари на головку рейки.

Вважається, що схід з рейок рухомого складу є здійсненим фактом, якщо колісна пара зорієнтується таким чином, що гребінь колеса вже знаходиться на поверхні кочення головки рейки.

Таким чином достатня умова вкочування колеса на головку рейки приймає наступний вигляд:

$$2l \cdot \sin \theta_{\max} = f, \quad (11)$$

де  $\theta_{\max}$  – значення кута, при якому гребінь колеса вже знаходиться на поверхні кочення головки рейки;  $f$  – висота, на яку має піднятися колесо, щоб його гребінь опинився на поверхні кочення головки рейки.

Виконаний аналіз публікацій та нормативних документів показав, що більшість розглянутих методик оцінюють імовірність сходу по одній колісній парі, не враховуючи впливу інших колісних пар, що може призвести до хибного встановлення причин сходу колісної пари з рейок. Крім того не враховуються горизонтальні та вертикальні нерівності колії, хоча, як показує досвід, основними причинами аварій і сходів на залізницях України є, передусім, відхилення в стані рейкової колії і ходових частин рухомого складу від норм їх утримання.

Тому для наближення результатів математичного моделювання до реальних умов експлуатації автори статті пропонують вирішувати задачу сходу колісної пари шляхом вкочування колеса на головку рейки з використанням динамічних рівнянь просторових коливань вагону, які виникають внаслідок геометричних нерівностей колії в горизонтальному та вертикальному напрямках.

Отже, підсумовуючи вищесказане, питання стосовно визначення оцінки безпеки від сходу колеса з рейки є актуальним і має важливе значення для забезпечення безпеки руху рухомого складу.

## Висновки

1. Питанню оцінки безпеки від сходу колеса з рейки присвячена значна кількість праць, кожна з яких має свої підходи до встановлення стійкості рейкового екіпажу.

2. Більшість розглянутих методик оцінюють імовірність сходу по одній колісній парі, не враховуючи впливу інших колісних пар, що може

привести до хибного встановлення причин сходу колісної пари з рейок.

3. Встановлено, що для наближення результатів теоретичних розрахунків до експериментальних даних, задачу сходу колеса з рейки слід розв'язувати з використанням рівнянь просторових коливань вагона.

4. При дослідженні стійкості рухомого складу слід враховувати відхилення в стані рейкової колії і ходових частин рухомого складу від норм їх утримання.

## Список літератури

1. Маслиев В. Г. Динамика локомотива с устройством для радиальной установки колесных пар в кривых. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки. Серія Транспорт*. 2002. № 6 (52). С. 69–74.
2. Азовский А. П., Котуранов В. Н., Овечников М. Н., Плотников И. В. Об оценке запаса устойчивости колеса от выкатывания на головку рельса. *Сборник статей международной конференции "Безопасность движения поездов"*. М.: МИИТ, 2007. С. VI-1–VI-2.
3. Котуранов В. Н., Иванов Д. В., Петров А. Г. Метод расчета запаса устойчивости колеса против схода с рельса. *Труды конференции "Безопасность движения"*. М.: МИИТ, 2010. С. VII-24.
4. Коган А. Я., Черняков Е. А. Оценка достаточного условия устойчивости колеса на рельсе с учетом вероятностного характера влияющего на нее некоторых факторов. *Вестник ВНИИЖТ*. 2008. № 2. С. 36–41.
5. Трофимов А. Н. Об устойчивости подвижного состава против схода с рельсов. *Труды ДИИТ*. 1983. Вып. 228/25. С. 23–26.
6. Прокудин И., Виноградов В., Воробьев Э. Пора выйти из тени. *Гудок*. 06.08.2003.
7. Винник Л. В., Бурчак Г. П. Замечания по поводу использования критерия Надаля при оценке безопасности схода с рельса. *Вісник Східноукр. націон. універ. ім. В. Даля*. 2005. № 8. Ч. 1. С. 108–113.
8. Elkins J., Huimin Wu. New Criteria for Flange Climb Derailment. *2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, April 4-6, 2000*, P. 1–7.
9. Evans J., Berg M. Challenges in simulation of rail vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2009. No. 47. P. 1023–1048.
10. Opala M. Analysis of experimental data in the context of safety against derailment of a railway vehicle. *Key Engineering Materials*. 2012. No. 518. P. 16–23.
11. Shabana A. Nadal's formula and high speed rail derailments. *J. Comput. Nonlinear Dynam.* 2012. No. 7.
12. Elkins J., Wu H. New criteria for flange climb derailment. *Railroad Conference*. 2000. P. 1–7.
13. Wu H., Shu X., Wilson N. Flange Climb Derailment Criteria and Wheel. *Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations*. TCRP Report, 2005. No. 71, P. 5.
14. Мартынов И. Э., Маслиев В. Г., Мокроусов С. Д. Износ гребней колес грузовых вагонов и рельсов: проблема и пути ее решения. *Вагонный парк*. 2013. № 5 (74). С. 4–7.
15. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов ж. д. МПС РФ колеи 1520 мм. М.: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1998. 145 с.
16. Нормы расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств моторвагонного подвижного состава ж. д. МПС РФ колеи 1520 мм. М.: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1997. 147 с.
17. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями. М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 346 с.
18. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Об устойчивости движения колеса по рельсу. *Вестник ВНИИЖТ*. 1965. № 4. С. 3–7.
19. Лукин В. В., Шадура Л. А., Котуранов В. Н., Хохлов А. А. Конструирование и расчет вагонов. М.: 2000. 725 с.
20. Клименко И. В. Развитие теоретических основ и методов оценки и повышения безопасности движения подвижного состава железных дорог: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. тр-та им. акад. В. Лазаряна. Днепропетровск, 2015. 284 с.
21. Сокол Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики). Київ: Транспорт України, 2004. 386 с.

## References

1. Masliev, V. G. (2002), "Dynamics of a locomotive with a device for radial installation of wheel pairs in curves" ["Динамика локомотива с устройством для радиальной установки колесных пар в кривых"], *Visnik Shidnoukr. nac. un-tu. Tehnichni nauki. Serija Transport*, No. 6 (52), P. 69–74.
2. Azovskij, A. P., Koturanov, V. N., Ovechnikov, M. N., Plotnikov, I. V. (2007), On the assessment the stability of the wheel from rolling out on the rail head [Ob ocenke zapasa ustojchivosti kolesa ot vykatyvanija na golovku rel'sa], *Sbornik statej mezhdunarodnoj konferencii "Bezopasnost' dvizhenija poezdov"*. М.: МИИТ, S. VI-1-VI-2.
3. Koturanov, V. N., Ivanov, D. V., Petrov, A. G. (2010), "The method of calculating the wheel's stability margin against derailment" ["Metod rascheta zapasa ustojchivosti kolesa protiv shoda s rel'sa"], *Trudy konferencii "Bezopasnost' dvizhenija"*, Moscow: МИИТ, P. VII-24.
4. Kogan, A. Ja., Chernjakov, E. A. (2008), "Assessment of the sufficient condition of wheel stability on the rail, taking into account the probabilistic nature of certain factors affecting it" ["Ocenka dostatochnogo uslovija ustojchivosti kolesa na rel'se s uchetoм verojatnostnogo haraktera vlijajushhego na nee nekotoryh faktorov"], *Vestnik VNIIZhT*, No. 2, P. 36–41.
5. Trofimov, A. N. (1983), "On the stability of rolling stock against derailment" ["Ob ustojchivosti podvizhnogo sostava protiv shoda s rel'sov"], *Trudy DIIT*, Issue 228/25, P. 23–26.

6. Prokudin, I., Vinogradov, V., Vorob'ev, Je. (2003), "Time to get out of the shadows" ["Pora vyjti iz teni"], *Gudok*.
7. Vinnik, L. V., Burchak, G. P. (2005), "Comments on the use of the Nadal criterion in evaluating derailment safety" ["Zamechanija po povodu ispol'zovanija kriterija Nadalja pri ocenke bezopasnosti shoda s rel'sa"], *Visnik Shidnoukr. nacion.univer. im. V. Dalja*, No. 8, Part 1, P. 108–113.
8. Elkins, J., Huimin, Wu. (2000), "New Criteria for Flange Climb Derailment", *2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, P. 1–7.
9. Evans, J., Berg, M. (2009), "Challenges in simulation of rail vehicle dynamics", *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, No. 47, P. 1023–1048.
10. Opala, M. (2012), "Analysis of experimental data in the context of safety against derailment of a railway vehicle", *Key Engineering Materials*, No. 518, P. 16–23.
11. Shabana, A. (2012), "Nadal's formula and high speed rail derailments", *J. Comput. Nonlinear Dynam.*, P. 7.
12. Elkins, J., Wu, H. (2000), "New criteria for flange climb derailment", *Railroad Conference*, P. 1–7.
13. Wu, H., Shu, X., Wilson, N. (2005), "Flange Climb Derailment Criteria and Wheel", *Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations*, TCRP Report, No. 71, P. 5.
14. Martynov, I. Je., Masliev, V. G., Mokrousov, S. D. (2013), "Wheel flange wear and rail freight cars: the problem and its solutions" ["Iznos grebnej koles gruzovyh vagonov i rel'sov: problema i puti ee reshenija"], *Vagonnij park*, No. 5 (74), P. 4–7.
15. Standards for calculating and assessing the strength of bearing elements, dynamic qualities and the impact on the path of the crew part of locomotives r.t. MRC RF track 1520 mm [Normy dlja rascheta i ocenki prochnosti nesushhih jelementov, dinamicheskikh kachestv i vozdejstvija na put' jekipazhnoj chasti lokomotivov zh. d. MPS RF kolei 1520 mm], Moscow : MPS RF, VNIIZhT, 1998, 145 p.
16. Standards for calculating and assessing the strength of the bearing elements and the dynamic qualities of the motor-wagon rolling stock r.t. MRC RF track 1520 mm [Normy rascheta i ocenki prochnosti nesushhih jelementov i dinamicheskikh kachestv motorvagonnogo podvizhnogo sostava zh. d. MPS RF kolei 1520 mm], Moscow : MPS RF, VNIIZhT, 1997, 147 p.
17. Norms for calculating and designing railroad cars of 1520 mm MRC railways (non-self-propelled) with changes [Normy rascheta i proektirovanija vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh) s izmenenijami], Moscow : GosNIIV-VNIIZhT, 1996, 346 p.
18. Verigo, M. F., Kogan, A. Ja. (1965), "On the stability of the movement of the wheels on the rail" ["Ob ustojchivosti dvizhenija kolesa po rel'su"], *Vestnik VNIIZhT*, No. 4, P. 3–7.
19. Lukin, V. V., Shadur, L. A., Koturonov, V. N., Hohlov, A. A. (2000), *Design and calculation of wagons [Konstruirovanie i raschet vagonov]*, Moscow, 725 p.
20. Klimenko, I. V. (2015), Development of theoretical foundations and methods for assessing and improving the safety of railway rolling stock [Razvitie teoreticheskikh osnov i metodov ocenki i povyshenija bezopasnosti dvizhenija podvizhnogo sostava zheleznyh dorog]: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.22.07, Dnepropetr. nac. un-t zh.-d. tr-ta im. akad. V. Lazarjana, Dnepropetrovsk, 284 p.
21. Sokol, Je. N. (2004), *Derailments and rolling stock collisions [Shody s rel'sov i stolknovenija podvizhnogo sostava (Sudebnaja jekspertiza. Jelementy teorii i praktiki)]*, Kyiv : Transport Ukraine, 386 p.

Надійшла (Received) 31.10.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Кузишин Андрій Ярославович** – Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, науковий співробітник, лабораторія "Залізнично-транспортних досліджень", Львів, Україна; e-mail: kuzyshyn1993@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3012-5395>.

**Кузишин Андрей Ярославович** – Львовский научно-исследовательский институт судебных экспертиз, научный сотрудник, лабораторія "Железнодорожно-транспортных исследований", Львов, Украина.

**Kuzyshyn Andriy** – Lviv Research Institute of Forensic Science, Research Worker, Laboratory "Railway Transport Research", Lviv, Ukraine.

**Батіг Андрій Васильович** – Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, старший науковий співробітник, лабораторія "Залізнично-транспортних досліджень", Львів, Україна; e-mail: batigasha1992@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1205-6004>.

**Batig Андрей Васильевич** – Львовский научно-исследовательский институт судебных экспертиз, старший научный сотрудник, лабораторія "Железнодорожно-транспортных исследований", Львов, Украина.

**Batig Andriy** – Lviv Research Institute of Forensic Science, Senior Research Worker, Laboratory "Railway Transport Research", Lviv, Ukraine.

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Предметом** исследования данной работы являются методы определения параметров безопасности от схода колеса с рельса. **Объектом** исследования является взаимодействие пути и подвижного состава. **Целью** данной работы является исследование подходов, которые применяют отечественные и зарубежные ученые, при оценке безопасности от схода колеса с рельса. Проанализировать аналитические условия вкатывания гребня колеса на головку рельса, которые являются критериями безопасности от схода колеса с рельса при исполнении железнодорожно-транспортных экспертиз. **Методами** исследования, которые используются в данной работе, есть: системный, логический и исторический подходы; анализа и синтеза, индукции и дедукции; моделирования. **Задачи** статьи заключаются в следующем: провести анализ методов определения критериев безопасности от схода колеса с рельса; оценить важность всех методов и подходов, выявить их недостатки и преимущества,

сделать рекомендации по совершенствованию метода оценки устойчивости рельсовых экипажей на железных дорогах Украины. **Результаты.** Проанализированы труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные вопросу оценки безопасности от схода колеса с рельса. Установлено, что для приближения результатов математического моделирования подвижного состава к реальным условиям эксплуатации задачу схода колесной пары с рельсового пути следует выполнять с использованием динамических уравнений пространственных колебаний. Было предложено при определении оценки безопасности от схода колеса с рельса учитывать аналитические условия вкатывания гребня колеса на головку рельса, которые были предложены д. т. н. Соколом Е. М. при проведении судебных железнодорожно-транспортных экспертиз. **Выводы.** Большинство рассмотренных методик оценивают вероятность схода по одной колесной паре, без учета влияния других колесных пар, что может привести к ошибочным результатам. Установлено, что для приближения результатов теоретических расчетов к экспериментальным данным, задачу схода колеса с рельса следует решать с использованием уравнений пространственных колебаний вагона.

**Ключевые слова:** сход колеса; колесная пара; гребень колеса; железнодорожно-транспортная экспертиза; безопасность движения.

## THE ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO CALCULATING TRAFFIC SAFETY CRITERIA IN THE RAILWAY SECTOR

The **subject matter** of the article is the methods for determining the safety parameters to prevent wheel derailment. The **object** of the study is the interaction of a rail track and rolling stock. The **goal** of the paper is to study of approaches that are used by domestic and foreign scientists to assess the protection against wheel derailment and to study the analytical conditions for the wheel flange rolling onto the rail top, which are the criteria of protection against derailment which are considered while expertizing the railway transport. The **methods** used in this work are the system, logical and historical approaches; analysis and synthesis, induction and deduction; modelling. The **tasks** of the article are as follows: to analyze the methods for determining the safety criteria from wheel derailment; to evaluate the importance of all methods and approaches, to identify their disadvantages and advantages, to make recommendations for improving the method of assessing the stability of rail vehicles on the railways of Ukraine. **Results.** The works of domestic and foreign scientists, which are devoted to the issue of assessing the protection against the wheel derailment were analyzed. It has been established that in order to approximate the results of mathematical modelling of rolling stock to the actual operating conditions, the task of the wheelset derailing from the track should be performed using dynamic equations of spatial oscillations. It was proposed to take into account the analytical conditions for wheel flange rolling onto the rail top, which were proposed by E. Sokol, the Doctor of Technical Sciences, when expertizing the railway transport. **Conclusions.** Most of the considered methods estimate the probability of a wheelset derailment without taking into account the influence of other wheelsets, which can lead to erroneous results. It has been established that in order to approximate the results of theoretical calculations to the experimental data, the problem of the wheel derailment should be solved using the equations of spatial oscillations of a rail car.

**Keywords:** wheel derailment; wheelset; wheel flange; railway transport expertise; traffic safety.