

УДК 625.03

РІВНІ СТАТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРАМВАЯ З РЕЙКОВОЮ КОЛІСЮ НА ЧЕТВЕРТІЙ ФАЗІ ПРОХОДЖЕННЯ ВАГОНОМ СТИКОВОЇ НЕРІВНОСТІ

Д-р техн. наук В.П. Шпачук, кандидати техн. наук О.О. Чупринін, А.О. Гарбуз, інж. Т.О. Супрун (ХНУМГ ім. О.М. Бекетова)

УРОВНИ СТАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАМВАЯ С РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕЕЙ НА ЧЕТВЕРТОЙ ФАЗЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВАГОНОМ СТЫКОВОЙ НЕРОВНОСТИ

Д-р техн. наук В.П. Шпачук, кандидати техн. наук А.А. Чупрынин, А.О. Гарбуз, инж. Т.А. Супрун (ХНУГХ им. А.Н. Бекетова)

LEVELS OF STATIC INTERACTION WITH RAIL TRACK TRAM AT THE FOURTH PHASE OF CARRIAGE PASSAGING UNDULATION IRREGULARITIES

Dr sc. sciences V.P. Shpachuk, phd. tehn. A.A. Chuprinin, A.O. Garbuz, eng. T.A. Suprun

Досліджено взаємодію рейкової колії та вагона в момент проходження стикової нерівності з урахуванням фази руху. Розглянута четверта фаза руху вагона, що характеризується перебуванням однієї колісної пари на рейці, що віддає, та трьох колісних пар на рейці, що приймає. Визначена висота стикової нерівності при різноманітних швидкостях та завантаженні вагона, а також величини ударного імпульсу й післяударної швидкості.

Ключові слова: вагон, рейкова колія, стикова нерівність, фаза руху, перша шпала, багатопрогінна балка, жорсткість балки, пружні опори.

Исследовано взаимодействие рельсовой колеи и вагона в момент прохождения стыковой неровности с учетом фазы движения. Рассмотрена четвертая фаза движения вагона, характеризующаяся нахождением одной колесной пары на отдающем рельсе и трех колесных пар на принимающем. Определена высота стыковой неровности при различных скоростях и загрузке вагона, а также величины ударного импульса и послеударной скорости.

Ключевые слова: вагон, рельсовая колея, стыковая неровность, фаза движения, первая шпала, многопролетная балка, жесткость балки, упругие опоры.

The present paper is studying the interaction of a track and a carriage at the time of passing the butt bumps taking into account movement phase. We consider the fourth phase of a carriage movement, characterized by finding one wheel set on a giving rail and three wheel sets on the host rail. Determine the height of the butt-bumps at different speeds and loading carriage as well as the magnitude of the shock pulse and post-impact speeds.

Keywords: carriage rail track, butt roughness, movement phase, the first tie, multi-span beam, the stiffness of the beam, an elastic support.

Вступ. Термін служби рейкової колії, вузлів та агрегатів рухомого складу залежить від спільної їх роботи та умов експлуатації, характеристик механічної системи «вагон – рейкова колея» [1-4]. Ізольовані стикові нерівності є найбільш слабкою ланкою рейкового транспорту. При цьому існує чотири фази руху вагона через ізольовану стикову нерівність згідно з проходженням стикової нерівності відповідною колісною парою. Кожна фаза руху визначається власними параметрами статичної і динамічної взаємодії між дискретною (вагон трамвая) та континуальною (рейкова колея) складовими системи, що розглядається.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Взаємодію рейкової колії та вагона розглянуто в роботах [2-4], але в них не враховано всі фази руху, що впливає на особливості переміщення транспортного засобу через стикову нерівність.

На відміну від робіт [5-9] у цій роботі проаналізовано статичну взаємодію вагона та рейкової колії шляху на четвертій фазі руху. Особливістю розглянутої фази руху є те, що на рейці, що віддає, в момент проходження вагоном стикової нерівності залишається лише одна колісна пара, а три інші вже розташовуються на рейці, що приймає.

Мета дослідження. Проведені дослідження спрямовувались на визначення величини ступеня стику в зоні ізольованої стикової нерівності, що у свою чергу дає змогу визначити величину ударного

імпульсу і післяударної швидкості рейки, що приймає. Це допоможе в удосконаленні параметрів у транспортному механічному комплексі «вагон – рейкова колея» у місці стикового з'єднання і стикової накладки шляхом їх раціонального вибору й оптимізації з урахуванням фаз руху на ділянці з ізольованою стиковою нерівністю.

Для досягнення поставленої мети вирішувалось таке завдання: методами моделювання і числового аналізу проаналізувати жорсткість багатопрогінної балки на пружних опорах, установити і проаналізувати параметри її силової взаємодії з колісними парами вагона з урахуванням експлуатаційних, механічних і геометричних параметрів транспортного засобу, рейки, стикових накладок, шпали і баластового шару, а також умов закріплення і прогинів рейки, що віддає і що приймає.

Матеріали та методи дослідження взаємодії четвертої колісної пари з приймальною рейкою. Схема проходження четвертою колісною парою рейкового стику зображена на рис. 1. Це відповідає відомій у будівельній механіці розрахунковій схемі багатопрогінної балки на пружних опорах [10].

При статичному розрахунку прогинів рейки використовується модель багатопрогінної балки на 23 пружних опорах (22 шпали і далі спирає на сусідню рейку через працюючу двоголову накладку [1, 11]). Для визначення жорсткості рейки на кінці $c_{p.k.}$ визначається

прогин рейки на кінці $\delta_{p.k.}$ від одиничної сили: $c_p = 1/\delta_{p.k.}$. Ураховуючи особливості з'єднання рейки, що віддає, і рейки, що приймає (пов'язаних працюючою накладкою з жорсткістю c_n), отримаємо

$$c_{p.k.} = \frac{c_p \cdot c_n}{c_p + c_n}. \quad (1)$$

Це дає змогу визначити параметри спирання рейки з урахуванням жорсткості з'єднання.

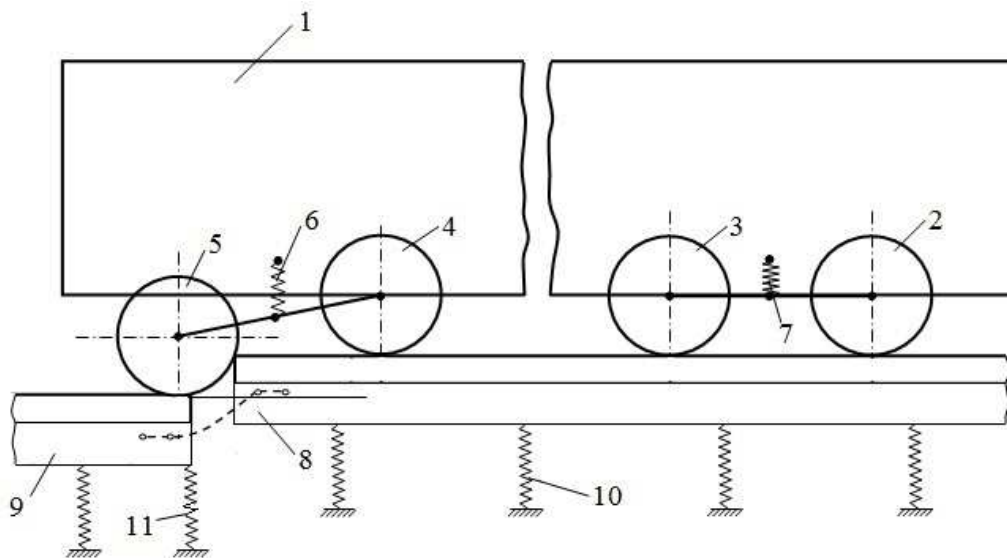


Рис. 1. Механічна схема на четвертій фазі руху вагона:

1 – вагон; 2-5 – колесо відповідної колісної пари; 6-7 – центральне підвішування вагона; 8 – рейка, що приймає; 9 – рейка, що віддає; 10 – пружні елементи, які моделюють жорсткість баластового шару під шпалами колії; 11 – пружний елемент, який моделює жорсткість рейки, що віддає, на кінці

Далі розглядаються прогини рейки на 23 пружних опорах. На рейці, що віддає, задаються зосереджені навантаження, кількість яких відповідає кількості коліс вагона, який переїздить стик. Розглянемо постановку статично невизначеної задачі деформування багатопрогінних (нерозрізних) балок на пружних опорах.

У розрахунковій схемі «пружинна» модель передбачає основу, яка симетрично чинить опір навантаженням (як стиску, так і розтягуванню), що не відповідає реальній основі, яка не може утримати балку від відриву. Однак при гравітаційній дії зосереджених сил, відповідній вазі вагона, що припадає на колеса, у балці відрив не відбувається [10].

Головними силовими факторами, що визначають статичний прогин рейки, що приймає, під першою шпалою є постійні за величиною зовнішні сили P_0 , що відповідають поточній кількості колісних пар на рейках. Вони прикладені (рис. 2) до рейки, що віддає, з координатою X_{B4} та до рейки, що приймає, з координатами (X_{Pi} , $i = 1, 2, 3$ – номер колісної пари вагона). Тут $X_{B4}=12,48$ м; $X_{P1}=1,9$ м; $X_{P2}=8,8$ м; $X_{P3}=10,7$ м; $l_1=0,55$ м; $l_2=1,1$ м; $l_3=1,65$ м; $l_4=2,2$ м; $l_5=2,75$ м; $l_6=3,3$ м; $l_7=3,85$ м; $l_8=4,4$ м; $l_9=4,95$ м; $l_{10}=5,5$ м; $l_{11}=6,05$ м; $l_{12}=6,6$ м; $l_{13}=7,15$ м; $l_{14}=7,7$ м; $l_{15}=8,25$ м; $l_{16}=8,8$ м; $l_{17}=9,35$ м; $l_{18}=9,9$ м; $l_{19}=10,45$ м; $l_{20}=11$ м; $l_{21}=11,55$ м; $l_{22}=12,1$ м; $l_{p.k.}=12,5$ м.

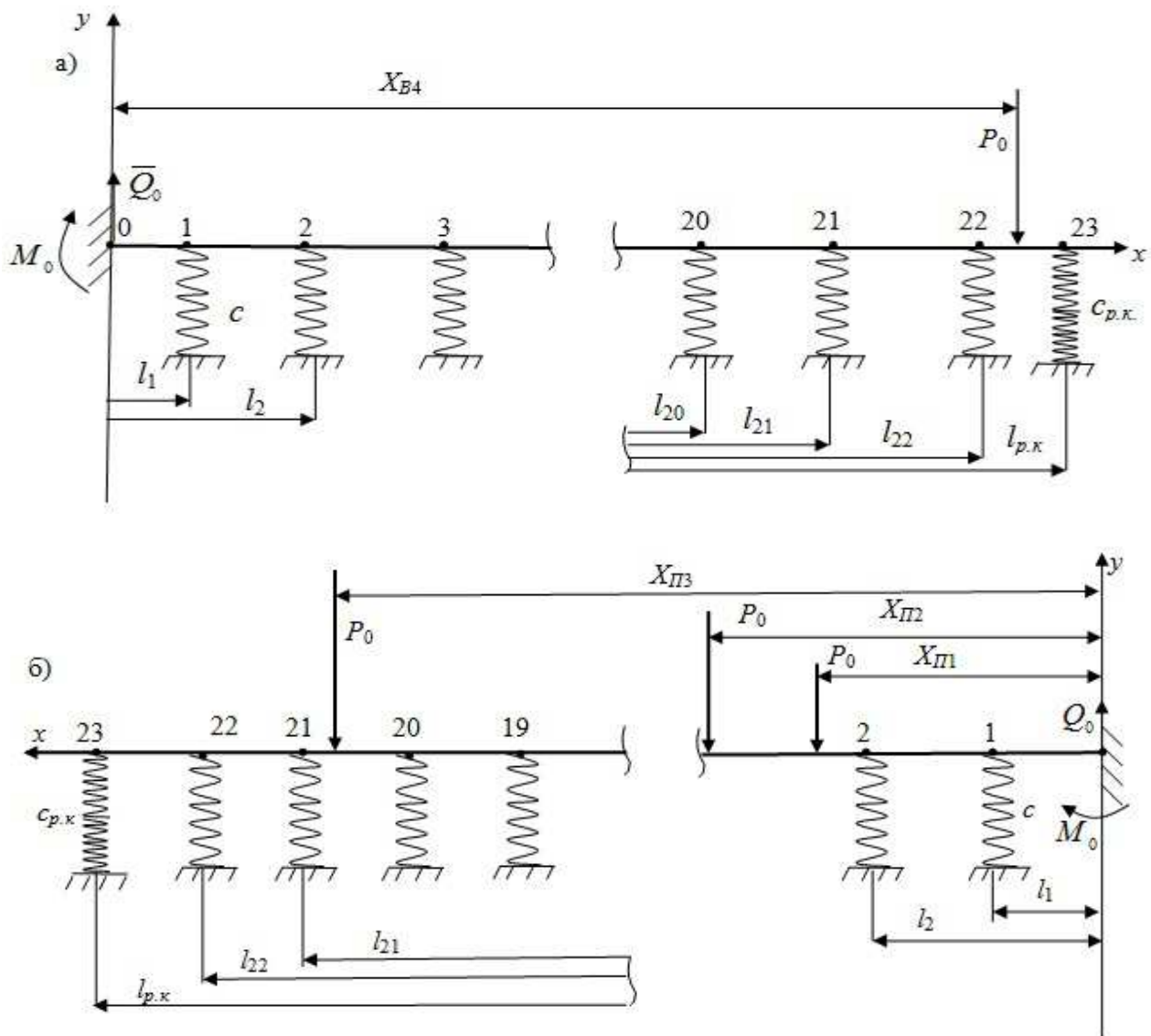


Рис. 2. Розрахункова механічна схема рейки, що віддає, (а) та рейки, що приймає, (б) на четвертій фазі руху вагона:

l_i ($i=1-22$), $l_{p.k.}$ – геометричні координати пружних опор; $P_0 = P/8$ – навантаження з боку вагона, що припадає на одне колесо; P – вага вагона з урахуванням його завантаження; Q_0 , M_0 – поперечна сила і згинальний момент на початку координат; c – жорсткість баластового шару під шпалою верхньої будови колії

Пружні лінії рейки, що віддає, та рейки, що приймає, наведено [12] на рис. 3.

Результати досліджень. Рівняння вигнутої осі рейок запишемо, використовуючи метод початкових

параметрів, з урахуванням умов закріплення рейок [1, 12]: на початку координати x прогини та кути повороту перерізу рейок дорівнюють $y_0 = 0$; $y'_0 = 0$.

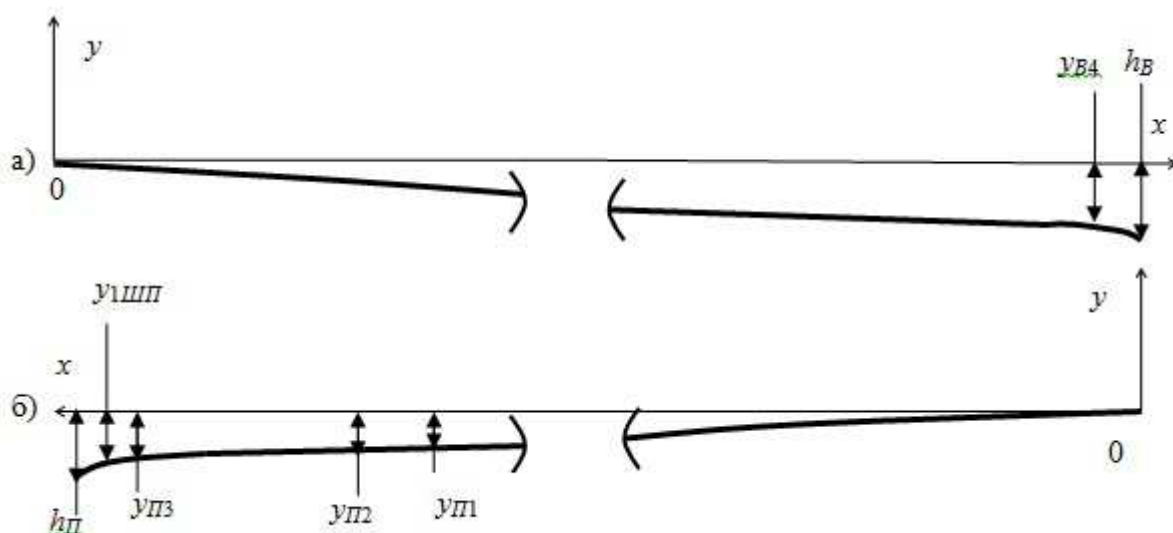


Рис. 3. Пружні лінії рейки, що віддає, (а) та рейки, що приймає, (б) на четвертій фазі руху вагона:

y_{B4} , y_{II1} , y_{II2} , y_{II3} , y_{1III} – прогини рейок під колесами вагона і першою шпалою рейки, що приймає, які відповідають координатам X_{B4} , X_{II1} , X_{II2} , X_{II3} , l_{22} .

У результаті отримаємо:

- рейка, що віддає:

$$y_B(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - P_0 \frac{(x - X_{B4})^3}{6} + \sum_{i=1}^{22} c y_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_B \frac{(x - l_{p.k.})^3}{6} \right]; \quad (2)$$

- рейка, що приймає:

$$y_{II}(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{k=1}^3 P_0 \frac{(x - X_{IIk})^3}{6} + \sum_{i=1}^{22} c y_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{II} \frac{(x - l_{p.k.})^3}{6} \right], \quad (3)$$

де Q_0 , M_0 – поперечна сила та згинальний момент на початку координати x ;

J – момент інерції перерізу рейки відносно нейтральної осі;

E – модуль пружності матеріалу рейки;

l – довжина рейки.

З визначених пружних ліній рейки, що віддає, і рейки, що приймає, розраховується поточна величина висоти стикової нерівності:

$$h = h_{II} - h_B, \quad (4)$$

де h_{II} , h_B – прогини рейки, що приймає, та рейки, що віддає, на кінцях, відповідно при $x=12,5$ м, тобто $h_B = y_B(l_{p.k.})$, $h_{II} = y_{II}(l_{p.k.})$.

З урахуванням того, що вирази (2) і (3) містять у правій частині доданки, які у свою чергу залежать від прогинів, розв'язання цих рівнянь виконано чисельно.

Методика розрахунку прогинів рейки на кінці від одиничної сили $\bar{F} = 1$ Н, рейки, що віддає, та рейки, що приймає, на кінці колії, а також поточної висоти стику h складається з чотирьох етапів.

На першому етапі за виразом (1) розраховується жорсткість $c_{p.к.}$ рейки на кінці при [1, 6] $c_H = 3,2 \cdot 10^6$ Н/м, де $c_p = 1/\delta_{p.к.}$, а $\delta_{p.к.}$ - прогин рейки на кінці

від одиничної сили $\bar{F} = 1$ без урахування стикових накладок, тобто при $c_H = 0$.

Відповідно до робіт [1, 6] та формули (2) прогин $\delta_{p.к.}$ визначається як

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \bar{F} \frac{(x-l_{p.к.})^3}{6} + \sum_{i=1}^{22} c y_i \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.к.} y_{23} \frac{(x-l_{p.к.})^3}{6} \right] \quad (5)$$

Блок-схему розрахунку прогину рейки на кінці на четвертій фазі руху вагона, відповідно до розрахункової механічної схеми на рис. 2, а, показано на рис. 4. Тут блок 2 – блок введення механічних, геометричних і граничних параметрів. У блоці 3 на першому кроці (при $j=1$) розраховуються початкові параметри Q_{01} і M_{01} при навантаженні рейки тільки зусиллям \bar{F} та відсутності

всіх пружних опор (на рис. 2, а) із умов її статичної рівноваги:

$$Q_{01} = \bar{F}; \quad M_{01} = -\bar{F}l_{p.к.} \quad (6)$$

Далі за виразом (5) розраховуються прогини y_i ($i=1, 23$) рейки під відповідними пружними опорами на рис. 2, а, яка навантажена силою \bar{F} і визначеними реакціями Q_{01} і M_{01} .



Рис. 4. Блок-схема розрахунку прогину рейки

На другому кроці ($j=2$) з урахуванням навантаження \bar{F} визначаються нові значення початкових параметрів Q_{02} і M_{02} :

$$Q_{02} = \bar{F} - \sum_{i=1}^{22} cy_i - c_{p.k.}y_{23};$$

$$M_{02} = -\bar{F}l_{p.k.} + \sum_{i=1}^{22} cy_i l_i + c_{p.k.}y_{23}l_{p.k.}, \quad (7)$$

де cy_i , $c_{p.k.}y_{23}$ - сили пружності відповідної опори рейки.

Ці початкові параметри є вихідними даними для циклу при $j = 2$.

Введення: статичного навантаження P_0 ; геометричних координат l_i ($i=1, 22$); $l_{23}=l_{p.k.}$; X_{B4} ; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$.

Рівняння рівноваги (6) і (7) матимуть вигляд:

$$Q_{01} = P_0; \quad M_{01} = -P_0x_{B4};$$

$$Q_{02} = P_0 - \sum_{i=1}^{22} cy_i - c_{p.k.}y_{23};$$

$$M_{02} = -P_0x_{B4} + \sum_{i=1}^{22} cy_i l_i + c_{p.k.}y_{23}l_{p.k.}.$$

Введення: статичного навантаження P_0 , геометричних координат l_i ($i=1, 22$); $l_{23}=l_{p.k.}$; $X_{II1}, X_{II2}, X_{II3}$; механічних характеристик рейки E, J ; примусового прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$.

У цьому випадку рівняння рівноваги (6) і (7) будуть:

$$Q_{01} = 3P_0; \quad M_{01} = -\sum_{k=1}^3 P_0x_{IIk};$$

$$Q_{02} = 3P_0 - \sum_{i=1}^{22} cy_i - c_{p.k.}y_{23};$$

$$M_{02} = -\sum_{k=1}^3 P_0x_{IIk} + \sum_{i=1}^{22} cy_i l_i + c_{p.k.}y_{23}l_{p.k.}.$$

Якщо похибка $\Delta = \max|y_{ij} - y_{i,j-1}|$ $i=(1, 23)$ виявляється більшою за задане значення ε , тоді відбувається наступний цикл за j . У роботі прийнято $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6}$ м.

Після досягнення умови $\varepsilon \leq \Delta$ розрахунок за циклом j припиняється, визначається кінцеве значення прогину $y(l_{p.k.}) = \delta_{p.k.}$ рейки на кінці, яке використовується при розрахунку відповідно $c_p = \frac{1}{\delta_{p.k.}}$ та $c_{p.k.}$, за виразом (1).

На другому етапі за алгоритмом етапу 1 розраховується величина прогину h_B рейки, що віддає, на кінці. При цьому блок 1 алгоритму матиме вигляд

Прогин рейки, що віддає, на кінці визначається за виразом (2) як $h_B = y_B(l_{p.k.})$ при досягненні умови $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 3 при розрахунку h_{II} рейки, що приймає, на кінці блок 1 алгоритму має вигляд:

Далі за формулою (3) визначається прогин рейки, що приймає, на кінці: $h_{II} = y_{II}(l_{p.k.})$. При цьому виконуватиметься умова $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 4 методики за виразом (4) розраховується висота $h = h_{II} - h_B$ стикової нерівності на четвертій фазі руху вагона.

У таблиці наведено величини висоти стикової нерівності на четвертій фазі руху,

які розраховані при таких параметрах механічної схеми вагона і рейкової колії (рис. 1), а також геометричних і механічних характеристиках рейки Р-65 трамвая Т-3 [1, 11, 13]: модуль пружності матеріалу рейки – $E = 2,6 \cdot 10^{11}$ Н/м²; момент інерції

перерізу рейки відносно нейтральної осі $J = 3573$ см⁴; жорсткість баластового шару колії – $c = 0,5 \cdot 10^8$ Н/м; зведена до одного колеса маса порожнього вагона $m = 2125$ кг, максимально (при 193 пасажирів) завантаженого $m = 3814$ кг.

Таблиця

Величина ступеня стику на четвертій фазі руху вагона

m , кг	2125	2294	2463	2632	2800	3138	3307	3476	3645	3814
h , см	0,212	0,239	0,262	0,284	0,304	0,322	0,339	0,351	0,361	0,371

Залежність $h(m)$ наведена на рис. 5. Носить вона параболічний характер, є монотонно зростаючою функцією і змінюється при $m = [2125 \div 3814]$ кг у діапазоні $h = [0,212 \div 0,371]$ см.

Висновки. Установлені значення величини ступеня h стику дають змогу з

урахуванням маси вагона, його завантаження і зведеної маси колеса визначити величину ударного імпульсу і післяударної швидкості рейки, що приймає, на кінці при розв'язанні задачі її динамічних прогинів у зоні розташування першої шпали.

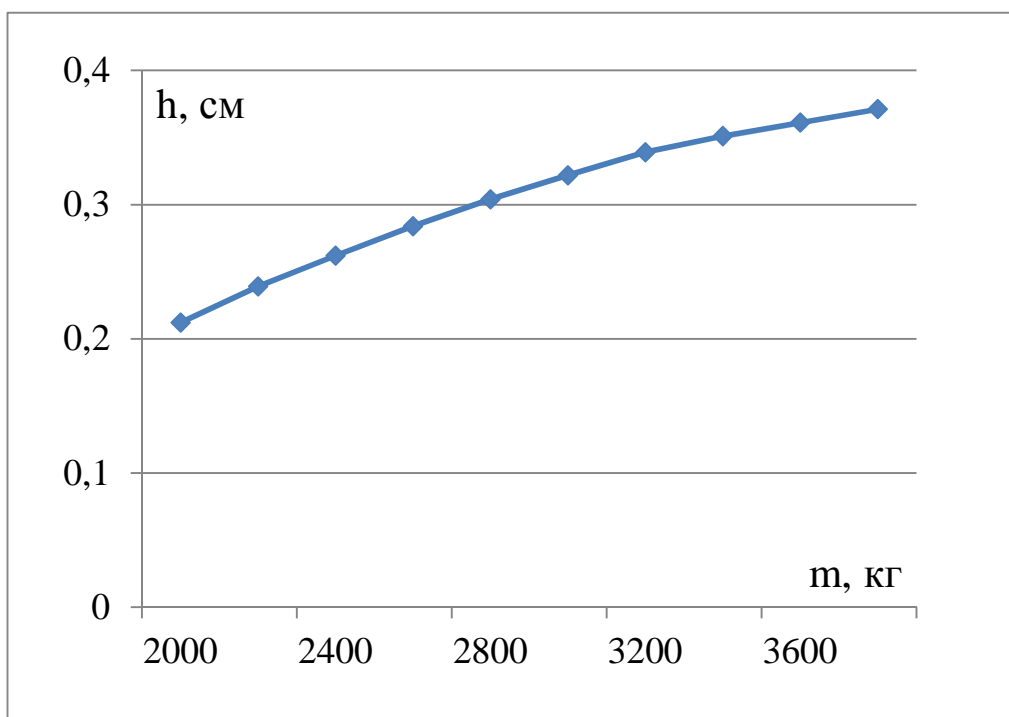


Рис. 5. Залежність висоти стику від завантаження вагона

Список використаних джерел

1. Шпачук, В.П. Стыкова динаміка трамвая [Текст] : монографія / В.П Шпачук, В.Х. Далека, А.В. Коваленко. – Харків: ХНАМГ, 2005. – 150 с.
2. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган; под ред. М.Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
3. Вершинский, С.В. Динамика вагонов [Текст] / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д Хусидов. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.
4. Лазарян, В.А. Динамика вагонов. Устойчивость движения и колебания [Текст] / В.А. Лазарян. – М.: Транспорт, 1964. – 255 с.
5. Шпачук, В.П. Динамічна взаємодія трамвая з рейковою колією при проходженні стыкової нерівності колії [Текст] / В.П. Шпачук, О.О. Чупринін, Т.О. Супрун // Комунальне господарство міст. – 2012. – №105. – С. 376-385.
6. Шпачук, В.П. Механическое взаимодействие трамвая с рельсовой колеей на второй фазе прохождения вагоном стыковой неровности [Текст] / В.П. Шпачук, А.А. Чупрынин, Т.А. Супрун // Транспорт Урала. – 2014. - №3 (42). – С. 7-12.
7. Шпачук, В.П. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на статичні і динамічні прогини рейкової колії в зоні стыкової нерівності [Текст] / В.П. Шпачук, О.О. Чупринін, Т.О. Супрун // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – №4 (76). – С 102-108.
8. Tomasz Kuminek A numerical analysis of the contact stress distribution and physical modelling of abrasive wear in the tram wheel-frog system [Text] / Tomasz Kuminek, Krzysztof Aniołek, Jakub Młyńczak // An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear. – Vol. 328. – 2015. – P. 177–185.
9. Jian Song Numerical prediction of ground vibrations induced by high-speed trains including wheel–rail–soil coupled effects [Text] / Song Jian, Chen Gongqi, Yang Jun // International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – Vol. 77. – 2015. P. 274–278.
10. Цвей, А.Ю. Балки и плиты на упругом основании. Лекции с примерами расчета по специальному курсу строительной механики [Текст]: учеб. пособие / А.Ю. Цвей. – М.: МАДИ, 2014. – 96 с.
11. ДСТУ 8193-73. Накладки двухголовые к рельсам типа Р-65 и Р-75 [Текст] . – Введ. 1975-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 5 с.
12. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Д.Ж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
13. ДСТУ 18232-83. Рельсы контррельсовые. Технические условия. [Текст] . – Введ. 1985-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 13 с.

Шпачук Володимир Петрович, д-р техн. наук, кафедра теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: (096) 010-60-33.

Чупринін Олександр Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: (099) 053-89-42.

Супрун Тетяна Олександрівна, інженер кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: (093) 417-09-93.
E-mail: ms.suprun1989@mail.ru.

Гарбуз Алла Олегівна, канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: (050) 300-68-19.

Shpachuk Vladimir Prtrovich, Dr. Sc. science of theoretical and structural mechanics O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (096) 010-60-33.

Chuprinin Aleksandr Alekseevich, PhD. Sc. Associate Professor of theoretical and structural mechanics O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (099) 053-89-42.

Suprun Tatiana Aleksandrovna, engineer of theoretical and structural mechanics O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (093) 417-09-93. E-mail: ms.suprun1989@mail.ru.

Garbuz Alla Olegovna, PhD. Sc. Associate Professor of theoretical and structural mechanics O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (050) 300-68-19.

Стаття прийнята 25.05.2016 р.