

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 625.1.033.34

D. M. KURHAN^{1*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

MODELING OF DEVELOPMENT VERTICAL DEFORMATION OF RAILWAY TRACK

Purpose. State of railway track must meet the conditions of safety, comfort and smooth ride. The presence of irregularities deteriorates the dynamics of interaction of track and rolling stock, causes speed limiting, creates the possibility of movement safety violation. This brings up the question concerning the study of the factors leading to the possibility of track irregularities and the process of their development. The purpose of this paper is to analyse the processes of emergence and development of irregularities in the area of unequal vertical elasticity of railway track using mathematical modelling. **Methodology.** Railroad under the trains works as the system of elastic bodies, so the emergence and development of irregularities can be represented as the transition from elastic to permanent strain. Irregularity development will affect the dynamics of interaction between track and rolling stock not only at the wheel location directly in the area of irregularity, but also at a certain distance beyond. Therefore, to study the development of irregularities, including those along the track, it is necessary to model the process of wheel load movement along the area. The adopted model consists of a wheel set moving on inertia-free beam and resting on individual supports. It is described by Lagrange differential equations. The work introduced the hypothesis that the level of permanent strain is distributed in proportion to the dynamic deflection derivative. **Findings.** Location of vertical longwise irregularity does not necessarily reproduce the location of the problem area. While in operation the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones. This leads to the development of so-called «pits» when approaching unequal-elastic areas. **Originality.** The work provides further development of tasks for track and rolling stock interaction modelling, in particular aimed to take into account the unequal elasticity areas and their influence on the formation of the track irregularities. The paper proposes new approaches to modelling the transition from elastic to permanent strain that allows predicting the development of track irregularity sizes depending on the area characteristics. **Practical value.** The results obtained by the author can be used to determine the schedule for track equal elasticity renovation works, as well as to analyse the measures aimed at the prevention of irregularities in areas with variable elasticity of railway track.

Keywords: track; track irregularity; rail deflection; unequal elasticity of track; interaction of track and rolling stock; railroad crossing

Introduction

During the whole period of operation the railway track must meet the desired conditions, especially the possibility to implement the set speeds. It is the practice to assess the track state by the indices of its geometric position.

During the track operation, even if it is in full compliance with the standards, various geometric irregularities are gradually emerging and developing. Their elimination and prevention are reputed to be the main task of interim track repairs and its current maintenance [11].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

The presence of significant irregularities deteriorates the dynamics of interaction of track and rolling stock, prevents from comfort riding and even creates the possibility of movement safety violation. When reaching a certain size the irregularities cause speed limiting [14]. This issue is of particular relevance in terms of modern trends of increasing velocity [7, 15], whereas the track maintenance rules in this case are more demanding.

Many modern scientific papers are devoted to problems related to the study of track irregularities. They cover the question of their influence on the train dynamic performance [8, 10, 17, 20], as well as the means and methods of their measurement and evaluation [12, 16], and the design of measures to strengthen the rail support layers to avoid the emergence of irregularities [18, 19, 21], etc.

This brings up the question concerning the study of the factors leading to the possibility of track irregularities and the process of their development. Given that railway track under the trains works as the system of elastic bodies, the emergence and development of irregularities can be represented as the transition from elastic to permanent strain. And that is emphasized in many scientific studies, the cause of this is usually the areas of local unequal elasticity.

Unequal elasticity of rail support can occur in different cases. This may be a result of railway track state violations – presence of track depression, unsuitable fastenings, ballast pollution, etc. [1, 20]. The most prone to the unequal elasticity development areas are those with heavy traffic or leaning on weak soils. Besides the track unequal elasticity can be caused by structural features, such as adjacency to non-ballast bridges [13], presence of crossings [6, 22], etc.

Purpose

The purpose of this paper is to analyse the processes of emergence and development of irregularities in the area of unequal vertical elasticity of railway track using mathematical modelling.

Methodology

Today there are many different methods of physical and mathematical modelling for interaction of railway track and rolling stock. Depending on the problem to be solved, one can use both relatively simple two-dimensional design models and

developed models, which include the systems with dozens of equations. Despite the fact that this refers to the interaction of track and rolling stock, still the problems focused on the rolling stock study, and those focused on the railway track study have fundamental differences. Rolling stock models are, in most cases, the systems of motion (vibrations) of the interconnected solids. Typically for the mathematical description of these models use the rail track more appropriate to describe not move through solids, and because of their deformity. Typically such models are mathematically described by D'Alembert's principle. Railway track operation is more naturally described not as motion of solids, but the strains thereof. Therefore, the railway track is more often mathematically described by the models based directly on elasticity or its numerical representations, such as FEM (finite element method) and others. Thus, using FEM, the authors of the works [9, 10] examined the accumulation process of track vertical strain in the experimental section caused by polycyclic application of force. The essence of modelling process described in these works was as follows. The first calculation resulted in sleeper displacement in a vertical plane due to the applied load. The calculation is repeated for subsequent iterations, but each sleeper displacement acquired in the previous calculation is retained in the form of air gap.

The calculation results of iterative simulation for track settlement are shown in Fig. 1. So the work [10] presents the conclusion that the increasing number of iterations (tonnage pass) leads to the development of track settlement, but the speed of this process over time decreases.

Increasing irregularity affects the dynamics of interaction between track and rolling stock. Here-with this effect will be significant not only at the wheel location directly in the area of irregularity, but also at a certain distance beyond (due to the gradual stabilization of vibrations and force redistribution among the bogie wheels). Therefore, to study the development of irregularities (including those along the track) it is necessary to model the process of wheel load movement along the area.

Given that all factors except vertical dynamics are irrelevant for this problem, we adopted a simplified model consisting of a wheel set moving on inertia-free beam (rail), resting on individual supports (sleepers). The modelling took into account the load transmitted from the wheel set, hard and

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

dissipative connections between bodies of the model, the possibility to set different hardness for each support and geometric outline of the rail in the vertical plane, Fig. 2.

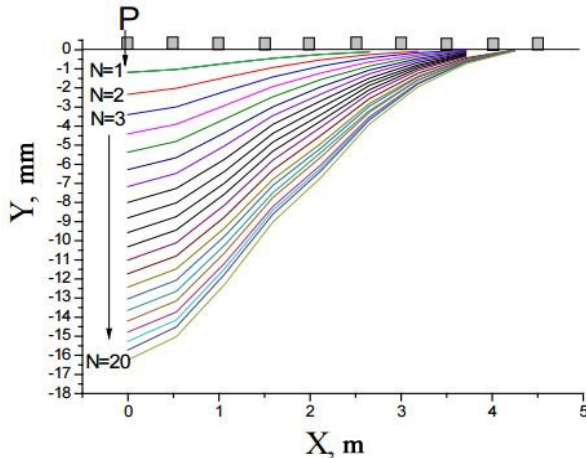


Fig. 1. Calculations results of iterative FEM modelling of track settlement [10]:

P – external load; Y – settlement; X – distance from the force application point; N – iteration number

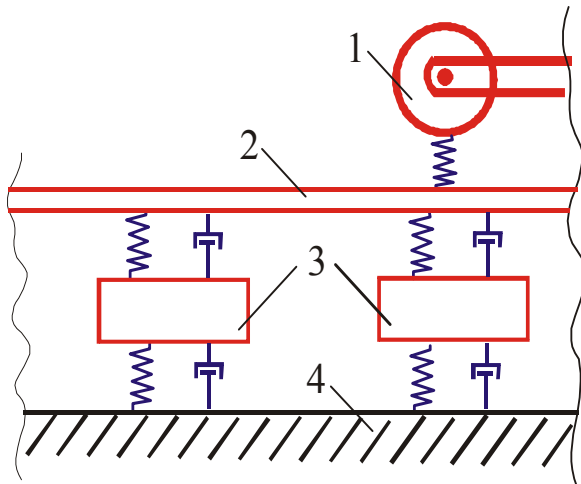


Fig. 2. Design model of interaction between track and rolling stock:

1 – wheel; 2 – rail; 3 – sleepers; 4 – sleeper support

The mathematical description of the model consists of a system of Lagrange differential equations of second kind and has no fundamental differences from similar works [2, 4].

Separation of permanent strains from total ones is a complex scientific problem, especially for multilayer systems such as railway track.

Establishing direct linear dependence of the permanent strains values on the total ones violates the adequacy of the model, especially under condi-

tions of stress, which is much lower than the level of strength (which is more typical for passenger traffic). In this case, the cause of permanent strains will be not the track deflections, but their longwise unevenness. Therefore the hypothesis was adopted that increase in permanent strains for the next step of iteration ($\Delta z_{perm}(x)$), determined by passed tonnage (T), is distributed along the area (x) in proportion to dynamic deflection derivative $z_{dyn}(x)$

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{perm}(x) &\sim \frac{dz_{dyn}(x)}{dx}, \\ \Delta z_{perm}(x) &\leq f(T), \\ \exists x, \Delta z_{perm}(x) &= f(T) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Findings

The proposed approach allows exploring the process of irregularity emergence caused by the track unequal elasticity and its subsequent development while in service.

Let's consider the calculation procedure based on the example with actual numerical output data. We assume the railway area with the place of local unequal elasticity, described by linear change of rail support elasticity modulus from 40 to 30 MPa in the middle of the area over 5 m length [5]. This corresponds to the following sequence performed to supports (sleepers):

$$U = \{40, \dots, 40, 37, 33, 30, 33, 37, 40, \dots, 40\}. \quad (2)$$

The first calculation is performed for the track without irregularities. Figure 3 shows the modelling results in the form of the area dynamic longwise deflection caused by passing rolling stock. The deflection in the zone of constant modulus of rail support elasticity corresponds to the analytical calculations by the known formula [2, 3]

$$z(x) = \frac{Pk}{2U}, \quad (3)$$

where P – wheel vertical force acting on the rail; k – relative rigidity factor.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

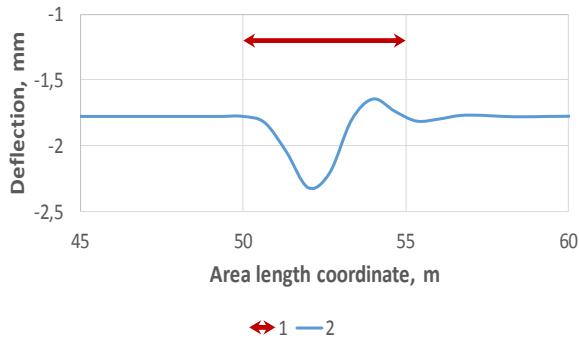


Fig. 3. Dynamic rail deflection for irregularity-free areas with local unequal elasticity:
1 – unequal elasticity zone; 2 – rail deflection

The algorithm (1) allowed determining the permanent strains and transferring them to the model as initial geometric track irregularity for the next iteration. Thus, the process of gradual development of irregularities is modelled – Fig. 4. For visual separation of results the iteration sequence in Fig. 4 is shown with omitted intermediate steps.

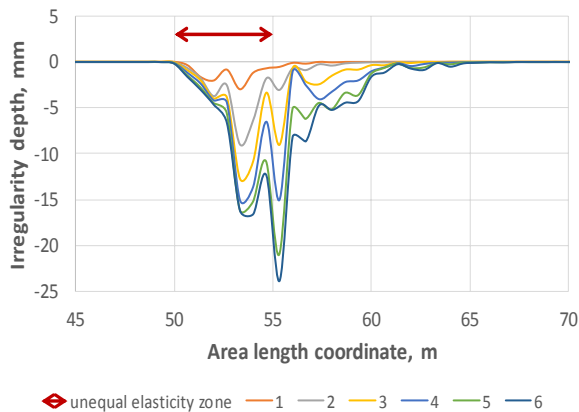


Fig. 4. Modelling of track irregularity development in the area of local unequal elasticity:
1 ... 6 – sequence of calculation iterations

Similar to the considered numerical example there were performed variant calculations for various input data. The study results allow us to establish certain tendencies. The irregularity outline, which is formed by permanent strains, reproduces neither the outline of dynamic rail deflection nor the outline of initial unequal elasticity. The permanent strains acquire a maximum at the entrance and exit of the dynamic irregularity (first it is unequal elasticity zone, which disturbs the trajectory of the wheel passing over it, and then – its merge with geometric (static) irregularity). While in operation

the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones. Development of irregularities with a gradual shift of peaks leads to the fact that it itself becomes more significant factor of additional force interaction compared to the original one – local unequal elasticity, causing further expansion and shift of irregularity. The result is that the geometric irregularity does not always strictly coincide with the location of cause of its formation.

In the above example (Fig. 4) the cause of irregularity formation was unequal elasticity zone. But once irregularity reaches a certain size, it is the one that defines the dynamics of interaction between track and rolling stock and, consequently, further development of the process. To demonstrate this observation the iterations in the previous example were stopped at formation of II-degree deflection [14] – the line «3» in Fig. 4. Further calculations include the constant modulus of rail support elasticity along the whole area. The resulted outline of the irregularity is shown in Fig. 5. For comparison, this figure also imposed irregularity from the previous example (line «6» in Fig. 4). Figure 5 shows that local irregularity area had already no significant effect on the development of irregularities.

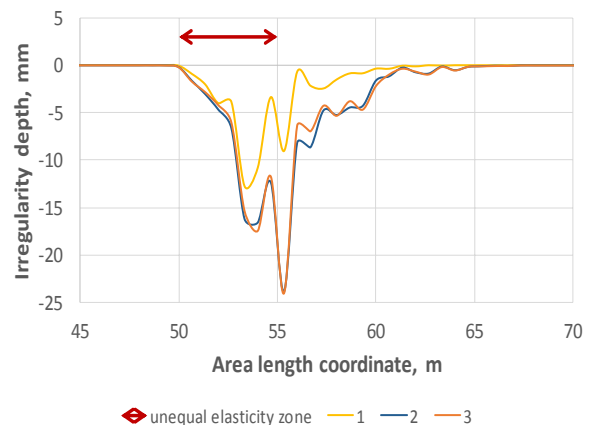


Fig. 5. Modelling of track irregularity development for different variants of area state:
1 – initial irregularity; 2 – irregularity formed in view of effect of initial unequal elasticity zone; 3 – irregularity, formed by the output of the conditions of area equal elasticity restoration

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

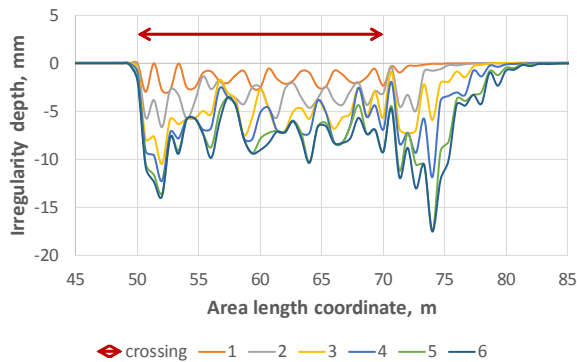


Fig. 6. Modelling of track irregularity in the crossing area:
1 ... 6 – sequence of calculation iterations

In some cases, the formation of track unequal elasticity zone might arise not from maintenance errors, but from design peculiarities, for example, transition area from ballast track to the bridge [13] or crossing zone [5, 6]. Based on the proposed method the development of vertical irregularities in the crossing zone was modelled. The crossing zone in the output data is a track area with high increase in modulus of rail support elasticity [6]:

$$U = \{40, \dots, 40, 120, \dots, 120, 40, \dots, 40\}. \quad (4)$$

The above example shows that the presence of the crossing, having formed a zone of increased modulus of rail support elasticity, provokes the emergence of track irregularity. The maximum amplitude of such irregularity will be located at the beginning and at the end of the formation. Over time of area operation, the irregularity will develop, along the track as well, that will lead to the emergence of «gaps» outside the structure. These findings correlate with the results of statistical processing of field measurements of irregularities ahead of non-ballast bridges and in the crossing area, that are given in the works [5, 6, 13] and others.

Originality and practical value

The work provides further development of tasks for track and rolling stock interaction modelling, in particular aimed to take into account the unequal elasticity areas and their influence on the formation of the track irregularities.

The paper proposes new approaches to modelling the transition from elastic to permanent strain that allows predicting the development of track

irregularity sizes depending on the area characteristics.

The obtained results can be used to determine the schedule for track equal elasticity renovation works (current maintenance, complex repairs, intermediate overhaul), as well as to analyse the measures aimed at the prevention of irregularities in areas with variable elasticity of railway track.

Conclusions

One of the main causes of geometric irregularities should be considered track unequal elasticity.

Location of vertical longwise irregularity does not necessarily reproduce the location of the problem area.

While in operation the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones.

The irregularity amplitude increase intensity in place of its original formation is reduced over operating time, but the process evolves in other places, resulting in development of so-called «pits» when approaching unequal-elastic areas.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гавриленко, А. К. Учет жесткости железнодорожного пути / А. К. Гавриленко // Путь и путевое хоз-во. – 2007. – № 4. – С. 37–39.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
3. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
4. Данович, В. Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 8. – С. 124–138.
5. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
6. Курган, М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96. doi: 10.15802/stp2015/55341.
7. Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине / Н. Б. Курган // Укр. залізниця. – 2015. – № 5–6. – С. 16–21.
 8. Лапина, Л. Г. Анализ статистических характеристик просадок рельсовых нитей и построение базовых неровностей пути / Л. Г. Лапина // Техн. механика. – 2013. – № 1. – С. 17–24.
 9. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием супер ЭВМ / В. П. Соловьев, А. В. Анисин, С. С. Надежин [и др.] // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития ж.-д. трансп. : сб. тр. членов и науч. партнеров Объединен. ученого совета ОАО «РЖД». – Москва : Интекс, 2013. – С. 185–192.
 10. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, С. С. Надежин // Бюллетень ОУС ОАО РЖД. – 2014. – № 4. – С. 2–29.
 11. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0287 / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсеєнко [та ін.]. – Київ : Дедалта, 2015. – 45 с.
 12. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 97–104. doi: 10.15802/stp2013/17971.
 13. Талавіра, Г. М. Осідання основної площадки земляного полотна від рухомого складу на перехідних ділянках перед штучними спорудами / Г. М. Талавіра // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту екон. і технол. трансп. Серія: «Транспортні системи і технології» / Київ. ун-т екон. і технол. трансп. – Київ, 2003. – Вип. 4. – С. 80–84.
 14. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук [та ін.] : затв. наказом Укрзалізниця № 033-Ц від 1.02.2012 р. – Київ : Транспорт України, 2012. – 25 с.
 15. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 29.12.2015.
 16. Уманов, М. И. Совершенствование оценки состояния пути с использованием среднеквадратических отклонений его геометрических параметров / М. И. Уманов, А. М. Патласов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 109–114.
 17. Ушкалов, В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Машенко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 135–144. doi: 10.15802/stp-2013/16600.
 18. Fischer, S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast / S. Fischer // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – Р. 97–106. doi:10.15802/stp2015/53169.
 19. Horvát, F. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests / F. Horvát, Sz. Fischer, Z. Major // Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – № 2. – Р. 21–44.
 20. Lichtberger, B. Thack compendium / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co., 2005. – 634 p.
 21. Petrenko, V. Simulation of subgrade embankment on weak base / V. Petrenko, I. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – Р. 198–204. doi:10.15802/stp2015/49286.
 22. Szabó, L. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures / L. Szabó, M. Somogyi, G. Horváth // Acta Technica Jaurinensis. – 2015. – № 2. – Р. 96–112. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n2.328.

Д. М. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Стан залізничної колії повинен відповідати умовам безпеки руху, плавності й комфортабельності їзди. Наявність нерівностей погіршує динаміку взаємодії колії та рухомого складу, стає причиною обмеження швидкості руху, створює можливість порушення умов безпеки руху. Постає питання дослідження факторів, що призводять до можливості утворення нерівностей колії та процесу їх розвитку. Метою даної роботи є аналіз процесів виникнення та розвитку нерівностей у зоні вертикальної нерівнопружності залізничної колії із застосуванням математичного моделювання. **Методика.** Залізнична колія під поїздами працює як система пружних тіл, тому поява та розвиток нерівностей можна представити як процес переходу від пружних до залишкових деформацій. Збільшення розмірів нерівності буде впливати на динаміку взаємодії колії та рухомого складу не тільки під час розташування колеса безпосередньо в зоні нерівності, а й на певній відстані за її межами. Тому для дослідження розвитку нерівності, в тому числі по довжині колії, необхідно моделювати саме процес руху колісного навантаження по ділянці. Прийнята модель, яка складається із колісної пари, що рухається по безінерційній балці та опирається на окремі опори. Вона описується системою диференціальних рівнянь Лагранжа. Введена гіпотеза, що рівень залишкових деформацій розподіляється пропорційно похідній динамічного прогину. **Результати.** Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов'язково повторює місце положення проблемної ділянки. З часом експлуатації вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й уздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та появою нових. Це призводить до розвитку так званих «ям» на підході до нерівнопружної ділянки. **Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу, зокрема для врахування ділянок нерівнопружності та їх впливу на утворення нерівностей колії. Запропоновані нові підходи щодо моделювання процесу переходу від пружних до залишкових деформацій, які дають змогу прогнозувати розвиток розмірів нерівностей колії в залежності від характеристик ділянки. **Практична значимість.** Отримані автором результати можуть бути використані для визначення термінів призначення ремонтних робіт із оновлення рівнопружності колії, а також для аналізу заходів, спрямованих на запобігання розвитку нерівностей у зонах із змінною пружністю залізничної колії.

Ключові слова: залізнична колія; нерівність колії; деформація колії; нерівнопружність колії; взаємодія колії і рухомого складу; залізничний переїзд

Д. Н. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Состояние железнодорожного пути должно соответствовать безопасности движения, плавности и комфортабельности движения. Наличие неровностей ухудшает динамику взаимодействия пути и подвижного состава, является причиной ограничения скорости движения, создает возможность нарушения условий безопасности движения. Возникает вопрос исследования факторов, которые приводят к возможности образования неровностей пути, и процесса их развития. Целью данной работы является анализ процессов возникновения и развития неровностей в зоне вертикальной неравножесткости железнодорожного пути с использованием математического моделирования. **Методика.** Железнодорожный путь под поездами работает как система упругих тел, поэтому появление и развитие неровностей можно представить как процесс перехода от упругих к остаточным деформациям. Увеличение размеров неровности будет влиять на динамику взаимодействия пути и подвижного состава не только во время нахождения колеса непосредственно в зоне неровности, а и на определенном расстоянии за ее пределами. Поэтому для исследования развития неровности, в том числе по длине пути, необходимо моделировать именно процесс движения колесной нагрузки по участку. Принята модель, состоящая из колесной пары, которая движется по безинерционной балке, опирающейся на отдельные опоры. Она описывается системой дифференциальных уравнений Лагранжа. Введе-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

на гипотеза, что уровень остаточных деформаций распределяется пропорционально производной динамического прогиба. **Результаты.** Расположение вертикальной неровности по длине не обязательно повторяет место положения проблемного участка. Со временем эксплуатации вертикальная неровность распространяется не только в глубину, но и вдоль пути, причем увеличение длины сопровождается смещением положения локальных максимумов и появлением новых. Это приводит к развитию так называемых «ям» на подходе к неравножесткому участку. **Научная новизна.** Приобрели дальнейшее развитие задачи моделирования взаимодействия пути и подвижного состава, в частности, для учета участков неравножесткости и их влияния на образование неровностей пути. **Практическая значимость.** Полученные автором результаты могут быть использованы для определения сроков проведения ремонтных работ по возобновлению равножесткости пути, а также для анализа мероприятий, направленных на предотвращение развития неровностей в зонах с переменной жесткостью железнодорожного пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь; неровность пути; деформация пути; неравножесткость пути; взаимодействие пути и подвижного состава; железнодорожный перегон

REFERENCES

- Gavrilenko A.K. Uchet zhestkosti zheleznodorozhnogo puti [Accounting of rigidity of a railway]. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2007, no. 4, pp. 37-39.
- Danilenko E.I. *Zaliznychna kolia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaemodiia z rukhomym skladom* [Railway track. Structure, planning and calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2. 456 p.
- Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [Rules of calculations of the railway track strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
- Danovich V.D., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Matematicheskaya model vzaimodeystviya puti i passazhirskogo vagona pri dvizhenii po uchastkam proizvolnoy krivizny [Mathematical model of interaction between the track and the passenger car when driving on sections of arbitrary curvature]. *Transport – Transport*, 2001, vol. 8, pp. 124-138.
- Kurhan D.M. Do vyrishennia zadach rozrakhunku kolii na mitsnist iz urakhuvanniam nerivnopruzhnosti pidreikovoї osnovy [To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 1 (55), pp. 90-99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
- Kurhan M.B., Kurhan D.M., Luzhytskyi O.F. Doslidzhennia nerivnostei kolii v mezhakh zaliznychnykh pereizdiv [Inequalities research of the track at the railroad crossings]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp.84-96. doi: 10.15802/stp2015/55341.
- Kurgan N.B. Predposylki stvoriennia vysokoskorostnykh magistralei v Ukraini [Prerequisites for creation of high-speed lines in Ukraine]. *Ukrainski zaliznytsi – Ukrainian Railways*, 2015, no. 5-6, pp. 16-21.
- Lapina L.G. Analiz statisticheskikh kharakteristik prosadok relsovykh nitey i postroeniye bazovykh nerovnostey puti [Analysis of statistical characteristics of rail sagging and the construction of basic irregularities of the track]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical Mechanics*, 2013, no. 1, pp. 17-24.
- Solovev V.P., Anisin A.V., Nadezhin S.S., Pevzner V.O., Tretyakov I.V. Modelirovaniye protsessa nakopleniya ostatochnykh deformatsiy puti s ispolzovaniyem super EVM [Modeling of accumulation process of residual deformations of the track using a super computer]. *Fundamentalnyye issledovaniya dlya dolgosrochnogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta : sbornik trudov chlenov i nauchnykh partnerov. Obiedineniye uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Fundamental research for long-term railway transport development : Proc. of members and scientific partners Association of the scientific Council of JSC «RZD»]. Moscow, Inteks Publ., 2013, pp. 185-192.
- Zheleznov M.M., Pevzner V.O., Solovev V.P., Nadezhin S.S. Nauchnyye osnovy modelirovaniya vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii [The scientific basis of modeling the interaction of track and rolling stock in modern conditions]. *Byulleten Obiedinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the joint scientific council of JSC «RZD»], 2014, no. 4, pp. 2-29.
- Babenko A., Lynnyk H., Moiseienko K. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy. TsP-0287* [The provision on scheduled preventive maintenance repair and track work on the Railways of Ukraine. TsP-0287]. Kyiv, Devalta Publ., 2015. 45 p.
- Kossov V.S., Bidulya A.L., Krasnov O.G., Akashev M.G. Rezultaty ekspluatatsionnykh ispytaniy geometricheski-silovogo metoda otsenki sostoyaniya puti [The field test results of geometric-force method for

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- track state estimation]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 5 (47), pp. 97-104. doi: 10.15802/stp2013/17971.
13. Talavira H.M. Osidannia osnovnoi ploshchadky zemlianooho polotna vid rukhomoho skladu na perekhidnykh diliankakh pered shtuchnyimi sporudami [Precipitation of the main site of the subgrade from rolling stock on transient phases before man-made structures]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu: Serii: «Transportni systemy i tekhnolohii»* [Proc. of Kyiv University of economy and technology of transport: Series: «Transportation systems and technologies»]. Kyiv, KUETT Publ., 2003, issue 4, pp. 80-84.
 14. Patlasov O.M., Rybkin V.V., Paleichuk Yu.V. *Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovoï kolii za pokaznykamy koliiyevymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoï kolii. TsP-0267* [Technical guidance on the assessment of the condition of the track according to the indicators of the track measuring cars and ensure the safe movement of trains when deviations from the norms of keeping the track. TsP-0267]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2012. 25 p.
 15. *Uhoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnyimi derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony* [The Association agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European atomic energy community and their member States, on the other hand]. Available at: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf (Accessed 29 December 2015).
 16. Umanov M.I., Patlasov A.M. Sovershenstvovaniye otsenki sostoyaniya puti s ispolzovaniyem srednekvadrateskikh otkloneniy ego geometricheskikh parametrov [Improving the estimation of track condition using standard deviations of its geometrical parameters]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 109-114.
 17. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnyye vozmushcheniya dlya otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [Calculated disturbances for evaluation of dynamical properties of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 4 (46), pp. 135-144. doi: 10.15802/stp2013/16600.
 18. Fischer S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp. 97-106. doi:10.15802/stp2015/53169.
 19. Horvát F., Fisher Sz., Major Z. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, no. 2, pp. 21-44.
 20. Lichtberger B. Thack compendium. Hamburg, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. Publ., 2005. 634 p.
 21. Petrenko V., Sviatko I. Simulation of subgrade embankment on weak base. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 4 (58), pp. 198-204. doi:10.15802/stp2015/49286.
 22. Szabó L., Somogyi M., Horváth G. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015, no. 2, pp. 96-112. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n2.328.

Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.); (Ukraine); Prof. E. I. Danilenko D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Dec. 03, 2015

Accepted: Feb. 04, 2016