

УДК 625.1

КОНЦЕПЦИЯ ДЕТАЛИЗАЦИИ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

БОНДАРЕНКО И. А.¹, д. т. н., доцент.

¹ Кафедра «Путь и путевое хозяйство». Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. ул. Лазаряна, 2, 49005, Днепр, Украина, тел +38 (056) 373-15-42, e-mail: irina_bondarenko@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-4717-3032.

Аннотация. Цель автора статьи развитие научных основ оценки работы железнодорожного пути под влиянием подвижного состава путем разработки современных методов определения рационального, с точки зрения технического использования пути, соотношения фактических условий эксплуатации пути, периодичности межремонтных схем и характеристик элементов конструкции пути, как основы создания методов и критериев оценки и прогнозирования работы пути под влиянием подвижного состава с учетом долговечности и уровня полноты безопасности взаимодействия пути и подвижного состава. **Методика.** Для достижения цели использованы принципы статистической механики, теории упругости и распространения волнового процесса при описании взаимодействия пути и подвижного состава. **Результаты.** Предложена концепция детализации условий взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта. Для решения задач о необходимости установления взаимосвязей между техническими и экономическими аспектами объектов железнодорожного транспорта, предложена концепция по обеспечению полноты безопасности работы конструкции железнодорожного пути в течение срока эксплуатации. Введены критерии, обеспечивающие взаимосвязь между техническими и экономическими аспектами и предложен алгоритм метода оценки деформативной работы пути по параметрам взаимодействия пути и подвижного состава. **Научная новизна.** Современные требования конкурентоспособности железнодорожного транспорта мотивируют разработку новых подходов для обеспечения взаимосвязи между техническими и экономическими аспектами работы объектов железнодорожного транспорта. На основе таких подходов осуществляется минимизация стоимости безопасного функционирования железнодорожной инфраструктуры с учетом фактических эксплуатационных условий. В работе предложены основные принципы оценки работы железнодорожного пути по деформативной работе пути под действием подвижного состава, как основы классификации технических состояний железнодорожного пути, соответствующих различным степеням надежности. **Практическая значимость.** Одним из главных факторов невозможности обеспечения взаимосвязи между техническими и экономическими аспектами работы объектов железнодорожного транспорта является отсутствие знаний о взаимосвязи между техническими состояниями элементов и конструкции железнодорожного пути, условиями эксплуатации и системой периодичности межремонтных схем на эксплуатационном этапе его жизненного цикла. Этот фактор требует введения новых подходов, критериев и методов оценки. Поэтому, предложенные концепция детализации условий взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, критерии деформативной работы элементов и конструкции пути, а также метод оценки деформативной работы пути по параметрам взаимодействия пути и подвижного состава позволяют исследовать взаимосвязь технических и экономических аспектов работы объектов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: элементы и конструкция железнодорожного пути; условия взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути; деформативная работа

КОНЦЕПЦІЯ ДЕТАЛІЗАЦІЇ ЯК СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

БОНДАРЕНКО І. О.¹, д. т. н., доцент.

¹ Кафедра «Колія та колійне господарство». Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. вул. Лазаряна, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел +38 (056) 373-15-42, e-mail: irina_bondarenko@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-4717-3032.

Анотація. Мета автора статті розвиток наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу шляхом розробки сучасних методів визначення оптимального, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем і характеристик елементів конструкції колії, як основи створення методів і критеріїв оцінки та прогнозування роботи колії під впливом рухомого складу з урахуванням довговічності і рівня повноти безпеки взаємодії колії і рухомого складу. **Методика.** Для досягнення мети використані принципи статистичної механіки, теорії пружності і поширення хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу. **Результати.** Запропоновано концепцію деталізацію умов взаємодії рухомого складу та залізничної колії як спосіб підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту. Для вирішення завдань щодо необхідності встановлення взаємозв'язків між технічними і економічними аспектами об'єктів залізничного транспорту, запропонована концепція щодо забезпечення повноти безпеки роботи конструкції залізничної колії протягом терміну експлуатації. Введено критерії, що

забезпечують взаємозв'язок між технічними і економічними аспектами і запропонований алгоритм методу оцінки деформативності роботи колії по параметрам взаємодії колії та рухомого складу. *Наукова новизна.* Сучасні вимоги конкурентоспроможності залізничного транспорту мотивують розробку нових підходів для забезпечення взаємозв'язку між технічними і економічними аспектами роботи об'єктів залізничного транспорту. На основі таких підходів здійснюється мінімізація вартості безпечного функціонування залізничної інфраструктури з урахуванням фактичних експлуатаційних умов. В роботі запропоновані основні принципи оцінки роботи залізничної колії за деформативною роботою колії під дією рухомого складу, як основи класифікації технічних станів залізничної колії, що відповідають різним ступеням надійності. *Практична значимість.* Одним з головних чинників неможливості забезпечення взаємозв'язку між технічними і економічними аспектами роботи об'єктів залізничного транспорту є відсутність знань про взаємозв'язок між технічними станами елементів і конструкції залізничної колії, умовами експлуатації і системою періодичності міжремонтних схем на експлуатаційному етапі її життєвого циклу. Цей фактор вимагає введення нових підходів, критеріїв і методів оцінки. Тому, запропонована концепція деталізації умов взаємодії рухомого складу та залізничної колії, критерії деформативності роботи елементів і конструкції колії, а також метод оцінки деформативності роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу дозволяють досліджувати взаємозв'язок технічних і економічних аспектів роботи об'єктів залізничного транспорту.

Ключові слова: елементи і конструкція залізничної колії; умови взаємодії рухомого складу та залізничної колії; деформативна робота.

CONCEPT OF DETAILIZATION AS A METHOD OF INCREASING THE COMPETITIVENESS OF RAILWAY TRANSPORT

BONDARENKO I. A.¹, *Dr. Sc. (Tech), associate professor.*

¹ Department "Path and track economy". Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. ul. Lazaryan, 2, 49005, Dnipro, Ukraine, tel +38 (056) 373-15-42, e-mail: irina_bondarenko@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-4717-3032.

Annotation. The *Purpose* of the author of the article is to develop the scientific basis for assessing the work of the railway track under the influence of rolling stock. For this purpose, a modern method has been developed for determining the rational, from the point of view of the technical use of the path, the relationship between the actual operating conditions of the track, the periodicity of the overhauling schemes, and the characteristics of the track design elements. This will be the basis for creating methods and criteria for estimating and forecasting the operation of the track under the influence of the rolling stock, taking into account the durability and the level of safety integrity of the track and rolling stock interaction. **Methodology.** To achieve the goal, the principles of statistical mechanics, the theory of elasticity and the propagation of the wave process in describing the interaction of a path and a rolling stock are used. **Findings.** The concept of detailing the conditions for the interaction of the rolling stock and the railway track as a way of increasing the competitiveness of the railway transport is proposed. To solve the problems of the need to establish interrelations between the technical and economic aspects of railway transport facilities, a concept is proposed to ensure the completeness of the safety of the railway track design during the service life. The criteria providing interrelation between technical and economic aspects are introduced and the algorithm of a method of an estimation of deformative work of a way on parameters of interaction of a way and a rolling stock is offered. **Originality.** Modern requirements of the competitiveness of railway transport motivate the development of new approaches to ensure the interrelation between the technical and economic aspects of the operation of railway transport facilities. On the basis of such approaches, the cost of safe operation of the railway infrastructure is minimized taking into account the actual operating conditions. The paper proposes the basic principles of railway track work evaluation for the deformative work of the track under the action of the rolling stock, as the basis for classifying the technical conditions of the railway track corresponding to different degrees of reliability. **Practical value.** One of the main factors of the impossibility of providing the interrelation between the technical and economic aspects of the operation of railway transport objects is the lack of knowledge about the relationship between the technical states of the elements and the railroad construction, the operating conditions and the periodicity system of the overhauls at the operational stage of its life cycle. This factor requires the introduction of new approaches, criteria and methods of evaluation. Therefore, the proposed concept of detailing the conditions for the interaction of the rolling stock and the railway track, the criteria for the deformative work of the elements and the design of the track, as well as the method for estimating the deformative work of the track in terms of the interaction parameters of the track and the rolling stock allow us to investigate the interrelation of the technical and economic aspects of the operation of railway transport facilities.

Key words: elements and construction of the railway track; conditions of interaction of the rolling stock and the railway track; deformative work.

Введение

Современные требования конкурентоспособности железнодорожного транспорта предусматривают минимизацию стоимости безопасного функционирования железнодорожной инфраструктуры с учетом фактических эксплуатационных условий. Одинаковые условия

содержания инфраструктуры априори не могут быть жизнеспособны для всех условий эксплуатации. Поэтому детализация этих условий способствует учету технических и технологических особенностей различных участков инфраструктуры, что позволит оптимизировать не только технологию технического содержания инфраструктуры, но и даст возможность рационально распределять материальные ресурсы на

ее содержания и, тем самым, будет способствовать повышению конкурентной способности железнодорожной отрасли в целом.

Движение подвижного состава по железнодорожному пути это, как известно, процесс взаимодействия, сопровождающийся динамическим воздействием подвижного состава на конструкцию пути. Ученые и исследователи используют различные методы оценки взаимного влияния подвижного состава и пути, формируя при этом соответствующие математические модели: алгоритм построения волновых полей, генерируемых подвижными осциллирующими нагрузками в гетерогенной области полупространстве и пакете слоев [4], устойчивость колебаний двухмассового осциллятора, который равномерно движется по балке модели Бернулли-Эйлера, лежит на вязко-упругом полупространстве [2], податливость железнодорожных линий с помощью модели балки на полупространстве и с помощью метода конечных элементов [3], расчеты вибраций в метрополитене, выполненных для модели, описанной методом граничных элементов, и по предложенному методу «труба в трубе» [9]. Работы [10, 14] являются продолжением исследований твердотельных моделей, с использованием характеристик, полученных в экспериментах и с применением метода конечных элементов. В работе ученых университета Лафборо (Великобритания) [5] собрано анализ полученных эмпирических данных и дана оценка моделей, применяемых при расчете колебаний в основании пути от воздействия подвижного состава, и рекомендации по дальнейшей корректировке моделей. В работе [11] представлено численное динамическое моделирование, в котором соединено два метода: трехмерной модели движения вагонов и метода конечных элементов. Изучение взаимного влияния подвижного состава и пути проводится и с помощью экспериментальных исследований. Так, в работах [2, 3] приведены результаты оценки состояния пути геометрически-силовым методом. А в работе [13] проводят оценку состояния пут по показателям, измеряемым на подвижном составе. Параллельно с развитием методов моделирования по изучению технических аспектов взаимовлияния подвижного состава и железнодорожного пути, развиваются теория и практический анализ оценки управления рисками на железнодорожном транспорте [12]. Основной целью этих процессов является развитие решений по разработке и поддержке способов и методов технического обслуживания железнодорожной инфраструктуры с целью эффективного вложения активов.

Современный этап развития концепции по обеспечению конкурентоспособности железнодорожного транспорта диктует необходимость по установлению взаимосвязей между техническими и экономическими аспектами на всех этапах жизненного цикла объектов

железнодорожного транспорта. Наиболее сложным процессом оценки стоимости жизненного цикла объектов железнодорожного транспорта является оценка его эксплуатационного периода.

Цель

Развитие научных основ оценки работы железнодорожного пути под влиянием подвижного состава путем разработки современных методов определения рационального, с точки зрения технического использования пути, соотношения фактических условий эксплуатации пути, периодичности межремонтных схем и характеристик элементов конструкции пути, как основы создания методов и критериев оценки и прогнозирования работы пути под влиянием подвижного состава с учетом долговечности и уровня полноты безопасности взаимодействия пути и подвижного состава.

Методика

Вариации в конструктивном оформлении и технологическом изготовлении одного и того же типа экипажа заставляют подходить к вопросу о выяснении влияния любого экипажа на рельсы, как к задаче теории вероятности. Таким образом, теория взаимодействия пути и подвижного состава является одной из ветвей общей статистической механики. И дает возможность рассмотрения и описания работы пути во времени по всем глобальным параметрам механической системы.

Если рассматривать железнодорожный путь как модель, созданную средствами теории распространения упругих волн [8, 7], представляющую собой систему объектов, которая обладает свойством замкнутой системы, то вполне возможно использовать все законы сохранения.

Адаптация изменения энергии конструкции железнодорожного пути и каждого ее элемента в частности к нормам и допускам по устройству и содержанию позволяет перейти к определению ее (и их) состояния в зависимости от условий эксплуатации и содержания. Дальнейшее решение вопроса связано с установлением зависимости процессов деформативности и количества энергии, необходимой для совершения деформативной работы конструкции пути. Связь количества деформативной работы с техническими состояниями, относящимися к различной степени надежности, позволит прогнозировать поведение конструкции пути при определенных условиях в течение срока службы элементов и конструкции пути.

Для решения вопроса по обеспечению полноты безопасности работы конструкции пути в течение срока эксплуатации необходимо, во-первых, сформировать комплекс оценочных условий по допустимым отклонениям при устройстве и содержании рельсовой колеи в соответствии межгосударственному стандарту ГОСТ 32192-2013.

Во-вторых, для каждого элемента конструкции пути сформировать комплекс оценочных условий технических состояний, относящихся к различной степени надежности, элементов пути по допустимым отклонениям конструкции и изменениям свойств материалов, происходящих в процессе эксплуатации и влияющих на их функционирование в течение эксплуатации. Указанное предложение предусматривает проведение дальнейших дополнительных экспериментов. В-третьих, с использованием предложенных критериев деформативной работы, определить влияние совокупного изменения состояний элементов на функционирование конструкции пути и по существующим требованиям устройства и содержания конструкции пути, сформировать комплекс оценочных условий состояний пути по допустимым отклонениям в элементах конструкции пути.

Для оценки и прогнозирования жизненного цикла функционирования железнодорожного пути, на основе вышеприведенных предложений, предложен алгоритм метода оценки деформационной работы пути по параметрам взаимодействия пути и подвижного состава приведен на рис. 1.

Работа силы, действующей на элемент конструкции пути (работа элемента пути):

$$A = \int_{t_1}^{t_2} P y dt, \quad (1)$$

где P - сила, действующая на элемент;

y - перемещение, которое сила вызывает во время воздействия.

Поскольку величины перемещений всех элементов пути имеют пространственный характер даже для одного сечения пути, предлагается использовать предложенный в работе критерий деформационной работы конструкции пути, как сумму работ, которые выполняют все элементы конструкции пути в одном сечении от воздействия подвижного состава с учетом времени восприятия и реакции элементов на воздействие:

$$A = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} A_i, \quad (2)$$

где A_i - работа отдельного элемента конструкции пути в интервале времени переработки влияния силы на элемент,

n - количество элементов, воспринимающих нагрузки от воздействия подвижного состава.

Сравнение фактических значений работы пути со значениями, полученными при учете условий по нормативной документации, позволит прогнозировать срок работы пути с учетом режима эксплуатации и состояния железнодорожного пути на участке, а также корректировать условия работы или системы проведения ремонтов и технического обслуживания.

Результаты

Предложена концепция детализации условий взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта. Для решения задач о необходимости установления взаимосвязей между техническими и экономическими аспектами цикла объектов железнодорожного транспорта, предложена концепция по обеспечению полноты безопасности работы конструкции железнодорожного пути в течение срока эксплуатации. Введены критерии, обеспечивающие взаимосвязь между техническими и экономическими аспектами, и предложен алгоритм метода оценки деформационной работы пути по параметрам взаимодействия пути и подвижного состава.

Научная новизна и практическая значимость.

Современные требования конкурентоспособности железнодорожного транспорта мотивируют разработку новых подходов для обеспечения взаимосвязи между техническими и экономическими аспектами работы объектов железнодорожного транспорта. На основе таких подходов осуществляется минимизация стоимости безопасного функционирования железнодорожной инфраструктуры с учетом фактических эксплуатационных условий. В работе предложены основные принципы оценки работы железнодорожного пути по деформативной работе пути под действием подвижного состава, как основы классификации технических состояний железнодорожного пути, соответствующих различным степеням надежности.

Одним из главных факторов невозможности обеспечения взаимосвязи между техническими и экономическими аспектами работы объектов железнодорожного транспорта является отсутствие знаний о взаимосвязи между техническими состояниями элементов и конструкции железнодорожного пути, условиями эксплуатации и системой периодичности межремонтных схем на эксплуатационном этапе его жизненного цикла. Этот фактор требует введения новых подходов критериев и методов его оценки. Поэтому, предложенные концепция детализации условий взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, критерии деформативной работы элементов и конструкции пути, а также метод оценки деформативной работы пути по параметрам взаимодействия пути и подвижного состава позволяют исследовать взаимосвязь технических и экономических аспектов работы объектов железнодорожного транспорта.



Рис. 1. Алгоритм метода оценки деформативной работы железнодорожного пути / Algorithm for estimating the deformative work of a railway track

Выводы

Составной частью надежности взаимодействия пути и подвижного состава являются: функциональная безопасность, готовность и ремонтпригодность (IEC 62278:2002, EN 50126-1-2017, EN 50126-2-2017 и IEC 60300-3-3:2017). Таким образом, направление исследований является актуальным, но требующим нового подхода при решении поставленной проблемы и не может применять существующие концепции, критерии и методы.

Анализ работы конструкции железнодорожного пути помог определиться с установлением основного фактора невозможности обеспечения взаимосвязи между техническими и экономическими аспектами работы объектов железнодорожного транспорта. Этим фактором является отсутствие знаний о взаимосвязи между

техническими состояниями элементов и конструкции железнодорожного пути, условиями эксплуатации и системой периодичности межремонтных схем на эксплуатационном этапе его жизненного цикла. Поэтому предложена концепция детализации условий взаимодействия подвижного состава и пути как способа повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта. И разработан алгоритм метода оценки деформативной работы железнодорожного пути, который позволяет прогнозировать срок работы пути с учетом режима эксплуатации и состояния железнодорожного пути на участке, а также корректировать условия работы или системы проведения ремонтов и технического обслуживания при условии обеспечения надежности и безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Веричев С. Н. Математические методы исследования устойчивости объекта, движущегося по упругой направляющей / С. Н. Веричев // Вестник нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2008. – № 4. – С. 117–121.
2. Коссов В. С. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 5 (47). – С. 97–104.
3. Краснов О. Г. Результаты оценки состояния пути диагностическим поездом геометрически-силовым методом / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, А. В. Ефименко, Т. Ю. Некрасова // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – Вип. 9. – С. 20–24.

4. Суворова Т. В. К расчету волнового поля, возбуждаемого встречными осциллирующими нагрузками в гетерогенном полупространстве: сб. тр. Всер. н.-т. конф. / Т. В. Суворова, С. А. Усошин // Транспорт-2011, 2011. – С. 37.
5. Auersch L. The Influence of the Soil on Track Dynamics and Ground-Borne Vibration / L. Auersch // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2008. – Vol. 99. – P. 122–128. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9_17.
6. Avillez, J. Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration: a review / J. Avillez, M. Frost, S. Cawser, C. Skinner, A. El-Hamalawi, P. Shields // ASME 2012 Noise Control and Acoustics Division Conference, 2012. – P. 381–392. doi: 10.1115/ncad2012-1083
7. Bondarenko I. Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work / I. Bondarenko. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – №6/7(84). – P. 28–36. Available at: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/9399/1/Bondarenko.pdf>
8. Bondarenko I. Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track / I. Bondarenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – №1/7(79). – P. 4–10. Available at: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/9400/1/Bondarenko.pdf>
9. Hussein, M. F. M. Using the PiP Model for Fast Calculation of Vibration from a Railway Tunnel in a Multi-layered Half-Space / M. F. M. Hussein, H. E. M. Hunt, L. Rikse, S. Gupta, G. Degrande, J. P. Talbot et al. // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2008. – Vol. 99. – P. 136–142. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9_19
10. Lombaert, G. Ground-Borne Vibration due to Railway Traffic: A Review of Excitation Mechanisms, Prediction Methods and Mitigation Measures / G. Lombaert, G. Degrande, S. Francois, D. J. Thompson // Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys. – 2008. – Vol. 126. – P. 253–287. doi: 10.1007/978-3-662-44832-8_33 5
11. Numerical simulation of dynamic response of subgrade under moving heavy truck in cold regions / Freng Zhang, DeCheng Feng, XianZhang Ling, QiongLin Li // Sciences in Cold and Arid Regions – 2013 – Vol. 5(4). – P. 468–477. doi: 10.3724/SPJ.1226.2013.00468.
12. Papathanasiou N. Improving risk management for infrastructure managers / N. Papathanasiou, M. Buurkhalter, B. T. Adey // Railway Gazette, March 2018, 31-33, 2018.
13. Ravitharan R. Instrumented revenue vehicles dive track maintenance efficiencies / R. Ravitharan // Railway Gazette, March 2018, 34-37, 2018.
14. Thompson, D. Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems / D. Thompson // 21st International Congress on Sound and Vibration. – Beijing, China, – 2014 – P. 1–16.

REFERENCES

1. Verichev S.N.. *Matematicheskiye metody issledovaniya ustoychivosti obekta, dvizhushchegosya po uprugoy napravlyayushchey* [Mathematical methods for studying the stability of an object moving along an elastic guide] Vestnik nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2008, issue 4, pp. 117-121. (in Russian).
2. Kossov B.C., Bidulya A.L., Krasnov O.G. and Akashev M.G. (2013). *Rezultaty ekspluatatsionnykh ispytaniy geometricheskii-silovogo metoda otsenki sostoyaniya puti* [Results of operational tests of a geometric-force method for estimating the state of a track] Visnik Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akad. V. Lazaryana., 5(47), pp. 97–104. (in Russian).
3. Krasnov O.G., Akashev M.G., Yefimenko A.V. and Nekrasova T.Yu. *Rezultaty otsenki sostoyaniya puti diagnosticheskim poezdom geometricheskii-silovym metodom* [Results of an estimation of a condition of a way by a diagnostic train geometrically-force method]. Put i putevoe khozaystvo, 2015, no. 9, pp. 20–24. (in Russian).
4. Suvorova T.V. and Usoshin S.A. *K raschetu volnovoogo polya, vzbuzhdaemogo vstrechnymi ostsilliruyushchimi nagruzkami v geterogennom poluprostranstve* [To the calculation of the wave field excited by counter-oscillating loads in a heterogeneous half-space]: V : sb. tr. Vser. n.-t. konf. «Transport-2011», Transport Publ., 2011, 37p. (in Russian).
5. Auersch L. *The Influence of the Soil on Track Dynamics and Ground-Borne Vibration. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design.* – 2008. – Vol. 99. – pp. 122–128. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9_17
6. Avillez J., Skinner C., Frost M. [et al.] *Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration: a review. ASME Proc. Noise Control and Acoustic Division Conference at InterNoise* (19.08–22.08. 2012). – New York, 2012, pp. 381–392, doi: 10.1115/ncad2012-1083.
7. Bondarenko I. *Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, №6/7(84), pp. 28–36.
8. Bondarenko I. *Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, no. 1/7(79), pp. 4 – 10.
9. Hussein M.F.M., Hunt H.E.M., Rikse L. and [et al.] *Using the PiP Model for Fast Calculation of Vibration from a Railway Tunnel in a Multi-layered Half-Space. Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys*, 99, 2008, pp. 136–142, doi: 10.1007/978-3-540-74893-9_19.
10. Lombaert G., Degrande G., Francois S. and Thompson D.J. *Ground-Borne Vibration due to Railway Traffic: A Review of Excitation Mechanisms, Prediction Methods and Mitigation Measures. Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys*, 126, 2008, pp. 253–287, doi: 10.1007/978-3-662-44832-8_33.
11. Zhang F., Feng D., Ling X. and Li Q. *Numerical simulation of dynamic response of subgrade under moving heavy truck in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions*, 5(4), 2013, pp. 468–477, doi: 10.3724/SPJ.1226.2013.00468.
12. Papathanasiou N., Buurkhalter M. and Adey B.T. *Improving risk management for infrastructure managers*, Railway Gazette, March 2018, 2018, pp. 31 - 33.
13. Ravitharan R. *Instrumented revenue vehicles dive track maintenance efficiencies. Railway Gazette*, March 2018, , 2018, pp. 34-37.
14. Thompson D., *Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems. 21st International Congress on Sound and Vibration* (13.07–17.07. 2014) Beijing, China, 2014, pp.1 – 16.0.