

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

БОНДАРЕНКО Ірина Олександрівна

УДК 625.1/.3-024.45/.049.5(043.5)

## ДИСЕРТАЦІЯ

### РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНКИ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ПІД ВПЛИВОМ РУХОМОГО СКЛАДУ

Спеціальності: 05.22.06 – залізнична колія; 05.22.12 – промисловий транспорт  
27 - Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

І.О. Бондаренко

Наукові консультанти:

Рибкін Віктор Васильович

доктор технічних наук, професор

Мямлін Сергій Віталійович

доктор технічних наук, професор

Дніпро 2017

## АНОТАЦІЯ

*Бондаренко І. О.* Розвиток наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – «Залізнична колія» та 05.22.12. – «Промисловий транспорт» (275 – Транспортні технології). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2017.

Дисертаційна робота пов'язана з розробкою наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу з урахуванням довговічності та рівня повноти безпеки взаємодії колії та рухомого складу, шляхом розробки сучасних методів визначення раціонального, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії. Актуальність теми підтверджена тим, що несуча здатність сучасних конструкцій верхньої будови колії перевищує рівень впливу рухомого складу на них, і у зв'язку з цим, змінився підхід до оцінки роботи колії під впливом рухомого складу від оцінки параметрів міцності елементів конструкції колії та стійкості рейко-шпальної решітки до оцінки надійної та функціонально-безпечної роботи конструкції колії. Вивчення умов надійної роботи конструкції колії передбачає вивчення умов безвідмовної роботи конструкції колії і настання її критичних станів, при яких доцільно проводити ремонти та технічне обслуговування для забезпечення ефективного використання конструкції протягом терміну експлуатації. Питання з оцінки та прогнозування надійної та функціонально-безпечної роботи колії є частиною загального розуміння і

підходу до управління показниками надійності і безпеки об'єктів залізничного транспорту з позицій оцінки ризиків і вартості життєвого циклу.

На підставі аналізу нормативної бази та результатів основних напрямків дослідження з визначення параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу, сформульована проблема щодо відсутності фізично обґрунтованого загально признаного методу з визначення механізмів передачі навантажень від рухомого складу на колію в часі та методу визначення параметричних даних розповсюдження взаємодії колії та рухомого складу. Існуючі методи з оцінки роботи колії потребують удосконалення, яке повинно бути направлене на прогнозування виконання робіт з обслуговування та ремонту залізничної колії і недопущення змін у її технічному стані, який не забезпечує необхідний рівень безпеки руху та обсяги перевезень, шляхом встановлення зв'язку між умовами функціонування елементів колії та роботою конструкції колії.

В дисертації запропоновано ввести поняття «статична деформативність колії», «динамічна деформативність колії», «деформативна робота колії», «життєвий цикл деформативної роботи колії» та критерії деформативної роботи елементів і колії, які дозволяють створити зв'язок між технічними станами елементів і конструкції колії, характеризують явища, що відбуваються в елементах та конструкції колії під впливом рухомого складу протягом терміну її експлуатації, та дозволяють сформулювати загальні підходи до оцінки роботи залізничної колії магістрального та промислового транспорту, що враховують деформативні властивості елементів залізничної колії.

Для проведення теоретичних досліджень у вигляді аналітично-чисельних розрахунків при описі впливу рухомого складу на колію та визначенні напружено-деформованого стану в елементах конструкції колії від взаємодії колії і рухомого складу використано методи математичного та фізичного моделювання із застосуванням теорій пружності та розповсюдження пружних хвиль.

Механізм впливу рухомого складу на колію представлено імпульсами, які збуджують площадки контакту рейок з колесами, що розташовані за

траєкторією руху колісної пари, з урахуванням часу появи та дії навантажень в них, що залежать від швидкості руху поїздів та надалі поширюється силовими хвилями. Поширення силової хвилі в елементах конструкції колії описано як процес виникнення (збудження) та розповсюдження об'ємних поздовжніх та поперечних сферичних хвиль, з урахуванням їх властивостей.

Зазначені впровадження дозволили отримати аналітичні залежності з визначення особливостей розповсюдження динамічного навантаження, які на відміну від існуючих, враховують два види частот передачі динамічного навантаження, змінну направленість в часі та зв'язок між амплітудами коливань як усередині елементів, так і при переході від одного елемента до іншого, та дозволяють описати процес розповсюдження силової хвилі в конструкції колії за часом з урахуванням зворотної реакції елементів на них.

Визначено вихідні дані для теоретичних досліджень, що пов'язані з параметрами процесу контакту коліс з рейками в залежності від технічного стану рейок з урахуванням горизонтальних переміщень колісної пари при її звивистому русі залізничною колією:

- параметри ширини контактної зони на поверхні кочення рейки, в залежності від наявності вертикального та бокового зносів;

- величини зазорів між колесом та рейкою, при яких відбувається безпечний рух (бандаж опирається на головку рейки частиною з уклоном  $1/20$ ) в залежності від наявності вертикального та бокового зносів рейок.

Завдяки формалізації понять та критеріїв деформативної роботи, розроблено метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу, який дозволяє дослідити зв'язок між фактичними умовами експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем та технічними станами елементів і конструкції колії.

Для застосування запропонованого методу теоретичної оцінки деформативної роботи колії, розроблено математичну модель просторових коливань елементів конструкції залізничної колії як механічної системи, яка відрізняється від існуючих математичних моделей більш досконалим

врахуванням фізико-механічних та геометричних параметрів елементів конструкції колії, та дозволяє при моделюванні зовнішньої дії рухомого складу, виконувати дослідження динамічних деформативних процесів системи елементів конструкції залізничної колії із застосуванням положень теорій пружності та просторового розповсюдження пружних хвиль і отримувати результати розповсюдження деформативного процесу колії за часом їх впливу з урахуванням зворотної реакції елементів.

Проведено експериментальну оцінку достовірності розробленої моделі. За порівнянням параметрів напружено-деформованого стану колії, встановлено, що напруження в кромках рейок, отриманих за запропонованою моделлю просторових коливань конструкції залізничної колії, відрізняються від отриманих експериментально на 2,3%, та підтверджує достовірність розробленої моделі. Різниця результатів розрахунку та експерименту за вертикальними прогинами рейок становить 19,5%, що обумовлено особливостями розташування прогиномірів, виміри яких не враховують прогини баластного шару та земляного полотна. Для підтвердження врахування особливостей розповсюдження силових хвиль запропонованою моделлю, проведено експеримент зі встановлення місць розташування датчиків виміру горизонтальних сил та фіксації датчиками поздовжніх сил, яким пояснено фізичну природу розкиду величин, що фіксуються датчиками при експерименті.

В якості основи класифікації надійності залізничної колії, розроблено нову систему оціночних умов технічних станів колії за станами надійності з використанням відомих принципів оцінки колії за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії, що забезпечить виконання вимог стосовно надійної роботи колії за міждержавним стандартом ГОСТ 32192-2013 та дозволяє оцінювати і прогнозувати транспортно-експлуатаційний стан залізничної колії магістрального та промислового транспорту.

На основі проведених досліджень, запропоновано розподіл допустимих значень ширини колії та допустимих значень динамічних розширень колії від дії рухомого складу за класифікацію станів надійності залізничної колії в

залежності від співвідношення ширини колії та параметрів коливання рухомого складу в поперечній площині відносно колії. Застосування зазначених класифікацій дозволило доповнити методику дослідження сходу з рейок рухомого складу при розпиранні рейкової колії.

Застосування розробленої моделі просторових коливань конструкції залізничної колії дозволило:

- встановити співвідношення між часом дії сили та часом і характером прогинів елементів і конструкції колії. Так, при дії рухомого складу на колію для всіх швидкостей руху максимальні значення амплітуди коливання конструкції колії мають місце при передачі навантажень баластним шаром земляному полотну;

- довести залежність між формою деформації елементів колії під впливом рухомого складу та співвідношенням часу дії навантаження до часу розповсюдження силових хвиль в елементах за напрямками розповсюдження, що дозволяє встановлювати умови сприймання навантажень елементами конструкції колії;

- встановити, що особливість роботи залізничної колії промислових підприємств пов'язана зі швидкостями руху, які застосовані на промислових підприємствах, оскільки вони формують основну різницю між характером деформативної роботи колії на промислових підприємствах та магістральних коліях, що полягає в різному сприйнятті навантажень елементами колії;

- дослідити поведінку процесу виникнення та розповсюдження силових хвиль в елементах і конструкції колії і показати можливість спрямованого регулювання процесу деформативності залізничної колії магістрального та промислового транспорту шляхом зміни характеристик матеріалів та конструкції елементів залізничної колії, що дозволяє обирати конструкцію колії або заходи щодо її посилення із забезпеченням певного рівня повноти безпеки та терміну служби;

- доповнити методику дослідження сходу з рейок рухомого складу при вкочуванні гребня колеса на головку рейки шляхом врахування динамічних прогинів рейок при розвантаженні коліс.

Робота спрямована на удосконалення методів оцінки роботи колії під впливом рухомого складу шляхом врахування вимог стосовно надійної роботи колії, направленими на недопущення змін у її технічному стані, який не забезпечує необхідний рівень безпеки руху та обсяги перевезень. Метод визначення параметричних даних розповсюдження взаємодії колії та рухомого складу, шляхом опису процесу розповсюдження імпульсу навантаження силовими хвилями в конструкції колії за часом з урахуванням зворотної реакції елементів на них, є новим та дозволяє вирішувати задачі з улаштування й утримання конструкції залізничної колії при забезпеченні її довговічності та повноти безпеки.

Ключові слова: надійність колії, функціонально-безпечна робота колії, деформативна робота, динамічне навантаження, амплітуда коливань, частота збудження імпульсом сили, розповсюдження коливань.

## ANNOTATION

*Bondarenko I.O.* Development of the scientific basis for assessing the operation of the railway track under the influence of rolling stock. –The qualification scientific work as a manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.06 - railway track, and 05.22.12. - industrial transport (275 - Transport technologies). - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2017.

The thesis is connected with the development of scientific bases for the evaluation of the operation of the railway track under the influence of rolling stock. While evaluating the work of the track, the conditions of durability and the level of safety integrity of the interaction of the track and the rolling stock are taken into account. This accounting is carried out by developing modern methods for determining the rationality of the track, from the point of view of technical use, of the relationship between the actual operating conditions of the track, the periodicity of the overhauling schemes, and the characteristics of the path design elements. The relevance of the topic is confirmed by the fact that the carrying capacity of modern structures of the permanent way of the railway exceeds the level of impact of the rolling stock on them. And in this connection, the principle of evaluating the work of the path from the evaluation of the strength parameters of the structural elements of the track and the stability of the rail-grating lattice to the assessment of the reliable and functionally safe operation of the track structure has changed. The study of the conditions of the reliable operation of the track construction implies the study of conditions for trouble-free operation of the structure of the track and the onset of its critical states, in which it is advisable to carry out repairs and maintenance to ensure the effective use of the structure during the service life. The issues of evaluation and forecasting of reliable and functionally safe operation of the track are part of a common understanding and approach to managing indicators of reliability and safety of railway transport facilities from the perspective of risk assessment and cost of the life cycle.

Analysis of the regulatory framework and the results of the main directions of the study to determine the parameters of the interaction of the railway track and rolling stock made it possible to formulate tasks, the fulfillment of which makes it possible to solve the problem posed in the dissertation. These include the lack of a method for determining the mechanisms for transferring loads from rolling stock to the railway track, taking into account the time of their contact and the method for determining the propagation parameters of the interaction of the track and rolling stock, considering the propagation time. The existing methods of assessing the

operation of the track require improvement. It should be aimed at forecasting the performance of works to maintain and repair the railway track and preventing changes in its technical condition that do not provide the necessary level of traffic safety and traffic volumes by establishing a link between the conditions of the functioning of the structural elements and the operation of the track design.

In the thesis it is proposed to introduce the concept of "static deformability of the track", "dynamic deformability of the track", "deformability work of the track", "life cycle of the deformability work of the track" and the criteria for deformability work of the elements and the track. Firstly, they allow to create a connection between the technical states of the elements and the design of the track, characterizing the phenomena occurring in the elements and the structure of the track under the influence of the rolling stock during the period of their operation. Secondly, they allow us to formulate general approaches to the assessment of the operation of the railroad track of the main and industrial transport, taking into account the deformability properties of railway track elements.

To carry out theoretical studies in the form of analytical-numerical calculations, in describing the effect of rolling stock on the track and determining the stress-strain state in the elements of the track design from the interaction of the track and the rolling stock, methods of mathematical and physical modeling using the theory of elasticity and propagation of elastic waves were used.

The mechanism of action of the rolling stock on the road is represented by pulses that excite the contact areas of the rails with wheels located along the path of the wheel pair. The excitation of contact areas takes place taking into account the time of occurrence and the effect of loads in them. The specified intervals of the action time of the pulse depend on the speed of the trains. The impulse along the construction of the path is propagated by the power waves. The propagation of a power wave in the elements of the track structure is described as the process of excitation and propagation of volume longitudinal and transverse spherical waves, taking into account their properties.

These introductions made it possible to obtain analytical dependencies to determine the features of dynamic load propagation. These include: two types of transmission frequencies of dynamic load, variable directivity in time, the relationship between the amplitudes of oscillations both within the elements and during the transition from one element to another. That allows us to describe the process of propagation of a power wave in the construction of a track in time, taking into account the inverse reaction of the elements on them.

The initial data for theoretical studies related to the parameters of the process of contact of wheels with rails are determined depending on the technical condition of the rails and taking into account horizontal displacements of the wheel pair with its twisting motion along the railway tracks:

- parameters of the width of the contact zone on the surface of the rolling of the rail, depending on the presence of vertical and lateral wear;
- the size of the gaps between the wheel and the rail at which safe movement occurs (the bandage rests on the railhead with a rolling surface area with a slope of  $1/20$ ), depending on the presence of vertical and lateral wear of the rails.

Owing to the formalization of concepts and criteria of deformability work, a method for the theoretical evaluation of the deformability work of the track has been developed in terms of the interaction parameters of the track and the rolling stock. It allows to investigate the relationship between the actual operating conditions of the track, the frequency of the overhauling schemes and the technical conditions of the elements and the design of the track. To apply the proposed method of theoretical evaluation of the deformability work of the path, a mathematical model of spatial oscillations of structural elements of the railway track as a mechanical system was developed. It differs from the existing mathematical models in a more perfect consideration of the physicomechanical and geometric parameters of the path construction elements. The developed model allows to perform the research of dynamic deformability processes of the system of railway track construction elements in modeling the external impact of the rolling stock due to the application of the theories of elasticity and the spatial distribution

of elastic waves. This makes it possible to obtain the results of propagation of the deformability process in the design of the path, taking into account the time of their action and the reverse reaction of the elements.

An experimental estimation of the reliability of the developed model has been carried out. Based on the results of a comparison of the parameters of the stress-strain state of the track, obtained by the proposed model and experimentally, it is established that the stresses in the rails edges differ by 2.3%, which confirms the reliability of the developed model. The difference between the values of the vertical deflections of rails obtained in the experiment and by calculation is 19.5%. This difference is due to the peculiarities of the location of the deflectors, the measurements of which do not take into account the deflections of the ballast layer and the ground base. To confirm the features of the propagation of power waves in the proposed model, an experiment was performed to determine the locations of the horizontal force sensors and fix the longitudinal forces of the sensors, which showed the physical nature of the spread of the quantities fixed by the sensors in the experiment.

As a basis for the classification of railway track reliability, a new system of evaluation terms for technical conditions of the track for reliability states has been developed. The evaluation system uses the well-known principles of estimating the path by permissible deviations in the assembly and maintenance of the track. The introduction of the developed assessment system will ensure compliance with the requirements of reliable operation of the track in accordance with the interstate standard GOST 32192-2013 and will allow to evaluate and forecast the transport and operational condition of the railway main and industrial transport route.

Based on the conducted studies, the distribution of permissible values of track widths and allowable values of dynamic track extensions depending on the impacts of the rolling stock according to the classification of railway track reliability states, depending on the ratio of track width and the rolling stock oscillation parameters in the transverse plane relative to the path has been proposed. The application of

these classifications made it possible to supplement the procedure for investigating the derailment of rolling stock when the rail track is being unraveled.

The application of the developed model of spatial oscillations of the railway track construction allowed:

- to establish a correlation between the time of the action of force and the time and nature of the deflections of the elements and the construction of the path. Thus, with the action of the rolling stock on the path for all speeds of movement, the maximum values of the amplitude of the oscillation of the path structure take place when the loads are transferred by the ballast layer to the ground base;

- to prove the relationship between the shape of the deformability of the track elements under the influence of the rolling stock and the ratio of the loading time to the time of propagation of power waves in the elements along the directions of propagation, which makes it possible to determine conditions for the perception of loads by the elements of the track design;

- to establish that the peculiarity of the work of the railway track of industrial enterprises is related to the speeds of movement that are applied in industrial enterprises. The speeds of movement of the rolling stock cause different perception of loads by the elements of the path, which forms the main difference between the nature of the deformability work of the track in industrial enterprises and trunk lines;

- to study the behavior of the process of generation and propagation of power waves in the elements and the design of the path and to show the possibility of directional control of the process of deformability of the railway track of main and industrial transport by changing the characteristics of materials and the construction of railway track elements. That allows you to choose the design of the track or measures to strengthen it, with a certain level of safety and life-span;

- to supplement the procedure for studying the derailment of rolling stock when rolling in a wheel ridge onto the rail head by taking into account the dynamic deflections of the rails when unloading the wheels.

The work is aimed at improving the methods of assessing the operation of the track under the influence of rolling stock. Improvement is made by taking into account the requirements for reliable operation of the track, which are aimed at preventing changes in its technical condition, which does not provide the necessary level of traffic safety and traffic volumes. The method for determining the parametric data of the propagation of the interaction of the track and the rolling stock (based on the description of the process of propagation of the load pulse by power waves in the design of the path in time, taking into account the reciprocal reaction of the elements on them) is new, and allows to solve problems in the design and content of the railway durability and completeness of safety.

Keywords: railway reliability, functional and safe operation of the railway, deformability work, dynamic load, amplitude of oscillations, excitation frequency by force pulse, oscillations propagation.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

Основні наукові праці:

- включені до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:

1. 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). – С. 4–10.

2. 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). – С. 28–36.

- включені до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»:

3. Бондаренко І. О. Стосовно питань моделювання життєвого циклу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №55. – С. 78–89.

4.Бондаренко І. О. Стосовно визначення функціонально-безпечної ширини колії / І. О. Бондаренко. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – №12. – С. 74–80.

5.Настечик М. П. Дослідження напруженого стану в елементах вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 під дією рухомого складу / М. П. Настечик, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №56. – С. 146–156.

6.Bondarenko I. O. Formation of estimated conditions for life cycle of deformation work of the railway track / I. O. Bondarenko. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №57. – С. 107–111.

7.Бондаренко І. О. Особливості дослідження процесу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №58. – С. 87–98.

8.Бондаренко І. О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №59. – С. 75–83.

9.Бондаренко І. О. Особливості деформативної роботи залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №60. – С. 45–56.

- в іноземних виданнях:

10. Бондаренко И. А. К вопросу об оценке влияния воздействий подвижного состава на путь / И. А. Бондаренко. // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2015. – №3. – С. 65–70.

11. Курган Д. Н. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Н. Курган, И. А. Бондаренко. // *Problemy Kolejnictwa-Zeczyt.* – 2013. – №159. – С. 99–111.

- у фахових виданнях, затверджених МОН України:

12. Харлан В. І. Вирішення задач вибору раціональних швидкостей руху поїздів за допомогою математичного моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки / В. І. Харлан, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* – 2007. – №16. – С. 41–44.

13. Бондаренко И. А. К вопросу о повышении качественной оценки работоспособности железнодорожного пути / И. А. Бондаренко. // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* – 2007. – №18. – С. 46–50.

14. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоку на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* – 2007. – №19. – С. 78–83.

15. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // *Транспортні системи і технології.* – 2011. – №18. – С. 14–18.

16. Рыбкин В. В. Методика оценки эксплуатационной надежности стрелочных переводов и их элементов / В. В. Рыбкин, Е. М. Баль, И. А. Бондаренко. // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* – 2010. – №35. – С. 124–128.

17. Бондаренко І. О. Рекомендацій щодо проектування конструкцій нижньої будови залізничної колії / І. О. Бондаренко. // *Вісник*

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №36. – С. 100–104.

18. Бондаренко І. О. Щодо забезпечення якості проектування конструкції земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №37. – С. 120–123.

19. Рибкін В. В. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів / В. В. Рибкін, О. М. Баль, І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №38. – С. 127–133.

20. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В. Е. Савлук. // Будівництво, реконструкція та експлуатація конструкцій і споруд залізничного транспорту. – 2012. – №31. – С. 225–230.

21. Бондаренко І. О. Стосовно питань щодо підвищення стабільності земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Транспортні системи і технології. – 2011. – №21. – С. 22–27.

22. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – №43. – С. 139–148.

23. Бондаренко І. О. Вплив контакту рейки та колеса на деформативну роботу залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – №10. – С. 77–81.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

24. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотуку на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Тези

XII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 28-30.05.2008. - Дніпропетровськ, 2008. - С. 45.

25. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д.М.Курган, І.О.Бондаренко. // Тези 69 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 21-22.05.2009. - Дніпропетровськ, 2009. - С. 160-161.

26. Патласов О. М. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко, В. Є. Савлук. // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.04.2011. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 176-177.

27. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.04.2011. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 177-178.

28. Рибкін В. В. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. М. Баль, І. О. Бондаренко. // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.04.2011. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 178-179.

29. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 23-25.05.2012. - Дніпропетровськ, 2012. - С. 27-28.

30. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В.Є. Савлук.

// Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 23-25.05.2012. - Дніпропетровськ, 2012. - С. 28-29.

31. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології», 11-12.04.2013. – Київ, 2013. - С. 96.

32. Рибкін В. В. Оцінка втомлено-міцнісних характеристик елементів вузла проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 при повторно-змінних циклах навантаження конструкції / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», 18-20.09.2013. - Дніпропетровськ, 2013. - С. 39.

33. Курган Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», 18-20.09.2013. - Дніпропетровськ, 2013. – С. 73-74.

34. Бондаренко І. О. До вирішення задач з прогнозування стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль [Текст] / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», 18-20.09.2013. - Дніпропетровськ, 2013. – С. 74-75.

35. Бондаренко І. О. Стосовно питань визначення надійності роботи земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези 74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 15-16.05.2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 14.

36. Бондаренко І. О. Щодо застосування геоматеріалів в конструкціях земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Тези 74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 15-16.05.2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 22

37. Бондаренко І. О. Особливості, що необхідно враховувати при відновленні стану земляного полотна / І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародного технічного семінару «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії», 25.09. 2015. - Львів, 2014. – С. 7-8.

38. Стеллей М. Перспективи дослідження модульної колійної техніки в Україні / М. Стеллей, Р. Голтгаус, О. М. Баль, М. А. Арбузов, І. О. Бондаренко, В. Є. Савлук. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 216-218.

39. Бондаренко І. О. Особливості, що необхідно враховувати при відновленні стану земляного полотна / І. О. Бондаренко. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 218-219.

40. Бондаренко І.О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 219-220.

41. Бондаренко І. О. Надійність і ресурсозбереження залізниць / І. О. Бондаренко. // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості». 10-13.06.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 26-27.

42. Бондаренко І. О. Стосовно оцінки впливу дії рухомого складу на залізничну колію / І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції ім. Сокола Е. М. «Безпека руху і наукові засади експертних

досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», 9-11.09.2015. – Львів, 2015. – С. 57-59.

43. Бондаренко І. О. Аналіз впливу колісної пари на процес деформативної роботи колії / І. О. Бондаренко. // Тези XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 25-27.05.2016. - Дніпропетровськ, 2016. – С. 26-27.

- які додатково відображають наукові результати дисертації:

44. Бондаренко І. О. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В.Є. Савлук. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №37. – С. 124–128.

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ВЗАЄМОДІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ І РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ЇХ НОРМАТИВНОЇ ОЦІНКИ .....	
	36
1.1. Огляд розвитку теоретичних досліджень з визначення параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу.....	36
1.2. Теоретичні методи визначення напружено-деформованого стану магістральної та промислової колій.....	46
1.2.1. Моделі колії, що використовуються.....	46
1.2.2. Урахування силового впливу.....	62
1.2.3. Нормативна оцінка параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу.....	64
1.3. Методика експериментального визначення напружено- деформованого та якісного стану колії.....	70
1.4. Висновки по розділу 1.....	72
РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ОЦІНКИ РОБОТИ КОЛІЇ ПІД ВПЛИВОМ РУХОМОГО СКЛАДУ .....	
	75
2.1. Передумови та основні поняття щодо дослідження деформативної роботи магістральної та промислової колій.....	75
2.2. Обґрунтування можливості застосування величин роботи діючих на колію сил як параметр її зношування.....	80
2.3. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для визначення напружено-деформованого стану елементів магістральної та промислової колій.....	91
2.4. Удосконалення методу визначення параметрів напружено- деформованого стану елементів залізничної колії для дослідження їх деформативної роботи .....	96

2.5. Метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу.....	105
2.6. Висновки по розділу 2.....	113
<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ.....</b>	
3.1. Методика проведення експерименту і обробки результатів.....	116
3.2. Результати натурного експерименту.....	120
3.3. Результати розрахунку параметрів напружено-деформованого стану колії за існуючим методом.....	128
3.4. Порівняння параметрів напружено деформованого стану колії за різними моделями і експериментом.....	135
3.5. Застосування запропонованого методу визначення напружено-деформованого стану колії в експериментальних дослідженнях.....	138
3.5.1. Врахування фізичної сутті роботи датчиків.....	138
3.5.2. Застосування запропонованого методу визначення напружено-деформованого стану колії при рішенні задач по розміщенню датчиків в експерименті.....	143
3.6. Висновки.....	149
<b>РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛІСНОЇ ПАРИ НА ДЕФОРМАТИВНУ РОБОТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ.....</b>	
4.1. Фактори взаємодії, що впливають на надійну та функціонально безпечну роботу магістральної та промислової колій.....	150
4.2. Вплив стану рейок і коліс на параметри контакту їх взаємодії...	154
4.3. Алгоритм розповсюдження силової хвилі від динамічного навантаження в конструкції колії.....	165
4.4. Вплив елементів колії на розповсюдження процесу деформативності магістральної та промислової колій.....	168
4.5. Висновки по розділу 4.....	175

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАТИВНОСТІ КОЛІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ.....	177
5.1. Врахування розбіжностей між квазідинамічними та динамічними характеристиками навантажень.....	177
5.2. Особливості геометрії навантаження вимушених коливань.....	180
5.3. Врахування зв'язку між амплітудами коливань при переході хвиль з одного елемента в інший.....	183
5.3.1. Вплив поодинокого вертикального навантаження.....	183
5.3.2. Вплив поодинокого горизонтального навантаження.....	210
5.4. Деформативна робота залізничної колії магістрального та промислового транспорту.....	210
5.5. Висновки по розділу 5.....	213
РОЗДІЛ 6. ОЦІНОЧНІ УМОВИ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ КОЛІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ.....	215
6.1. Оціночні умови за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії.....	215
6.2. Оціночні умови за допустимими значеннями ширини колії та допустимими динамічними розширеннями колії.....	226
6.3. Врахування деформованості колії при оцінці умов щодо забезпечення стійкості колеса на рейці.....	231
6.4. Рекомендації застосування запропонованого методу стосовно формування класифікації станів колії за умовами стійкості рейко- шпальної решітки .....	235
6.4.1. Стійкість в подовжньому напрямку колії.....	235
6.4.2. Стійкість колії в поперечному напрямку .....	237

6.5. Рекомендації щодо вирішення задач з улаштування конструкції залізничної колії для забезпечення її довговічності.....	241
6.5.1. Фізична сутність процесів руйнування залізничної колії..	241
6.5.2. Алгоритми вирішення задач з улаштування конструкції магістральної та промислової колій.....	242
6.6. Висновки по розділу 6.....	249
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	251
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	256
ДОДАТКИ.....	296
Додаток А. Пружні характеристики конструкцій колії.....	297
Додаток Б. Характеристики взаємодії колісної пари з рейками.....	301
Додаток В. Данні експерименту.....	311
Додаток Г. Акти впровадження та використання результатів дисертації.....	317
Додаток Д. Список публікацій та відомості про апробацію результатів дисертації.....	321

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Залізничний транспорт є провідною галуззю в транспортно-дорожньому комплексі України, який забезпечує 58% [1] вантажообігу і 36% пасажирообігу країни [2]. Більше половини вантажів, що перевозяться по магістральних залізницях, навантажуються на коліях промислових підприємств. Наразі загальною частиною елементів інфраструктури залізниць практично вичерпано технічний ресурс через велику ступінь фізичного зносу та відхилення від необхідного обсягу проведення регламентних ремонтних та відновлювальних робіт, що ставить під загрозу їх подальше ефективне та безпечне функціонування.

В рамках концепції подальшого розвитку інфраструктури залізничного транспорту України [3, 4, 5] передбачено дотримання міждержавних стандартів Європейського Співтовариства. У Директиві 2008/57/ЄСІ [6] зазначено «Існують суттєві відмінності між національними регламентами та внутрішніми правилами, технічними специфікаціями, які застосовуються на залізницях, оскільки вони включають технології, що є специфічними для галузей національної промисловості, та передбачають спеціальні розміри, прилади та характеристики... Зокрема, необхідно встановити чітку межу між стандартами чи частинами стандартів, які мають бути обов'язковими з метою досягнення цілей цієї Директиви, та «гармонізованими» стандартами, що були розроблені у дусі нового підходу до технічної гармонізації та стандартизації». За Директивою 2004/49/ЄС [7] «Національні правила безпеки, які часто базуються на національних технічних стандартах, повинні поступово замінюватися правилами, які базуються на загальних стандартах, встановлених технічними стандартами експлуатаційної сумісності. Введення нових особливих національних правил, які не базуються на таких загальних стандартах, повинно зводитися до мінімуму. Нові національні правила повинні відповідати законодавству Співтовариства та полегшувати перехід до загального підходу до

безпеки на залізниці.». Отже, з'явилась необхідність у розробці механізму приведення нормативної бази застосованої на транспорті в Україні до законодавства Співтовариства, про що зазначено у «Транспортній стратегії України на період до 2020 року», яка затверджена Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 2174-р від 20.10.2010 р. У зв'язку з цим основним напрямком удосконалення нормативної бази на залізничному транспорті України за останні роки стало врахування реального технічного стану елементів інфраструктури та рухомого складу з безумовним дотриманням вимог безпеки руху. Оцінка показників безпечної експлуатації конструкцій магістральної та промислової залізничної колії, як підсистеми інфраструктури залізничного транспорту, повинна базуватись на дотриманні вимог з її надійної та функціонально безпечної роботи. Відсутність методів і критеріїв оцінки та прогнозування роботи колії під впливом рухомого складу з урахуванням довговічності та рівня повноти безпеки взаємодії колії та рухомого складу потребує проведення додаткового наукового дослідження.

Удосконалення методів оцінки роботи колії під впливом рухомого складу за такими показниками надійності як коефіцієнт готовності та коефіцієнт технічної готовності [8, 9], які поєднують технічний, економічний та функціональний аспекти роботи колії надасть можливість оцінювати та прогнозувати транспортно-експлуатаційний стан і терміни безпечної експлуатації залізничної колії протягом терміну її експлуатації, що характеризує тривалість життєвого циклу роботи колії, вирішувати завдання з улаштування та утримання елементів конструкції залізничної колії для забезпечення показників довговічності та систематизувати вимоги до стану колії та рухомого складу для забезпечення необхідного рівня безпеки їх взаємодії. Тому тема дисертаційної роботи, що пов'язана з розробкою наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу з урахуванням довговічності та рівня повноти безпеки взаємодії колії та рухомого складу, є актуальною для залізничного магістрального та промислового транспорту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Напрямок досліджень дисертаційної роботи пов'язаний з Концепцією формування сталої національної транспортної політики всіх видів транспорту та засад (стратегії), Транспортною стратегією України на період до 2020 року [4] та Державною цільовою програмою реформування залізничного транспорту на 2010-2019 рр. [5], а також взятих на себе зобов'язань у частині імплементації законодавства ЄС у рамках Угоди про асоціацію [6, 7, 10], та з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, що виконувались за завданням Департаменту колії та споруд господарства ПАТ «Укрзалізниця» та промислових підприємств з виробництва та експлуатації рухомого складу і елементів інфраструктури. За наступними науково-дослідними роботами: «Дослідження параметрів деформативності колії та розробка критеріїв її оцінки» (ДР №0107U005240); «Експериментальні дослідження впливу на колію та стрілочні переводи двох дослідних зразків напіввагонів на візках моделі ICG Motion-Control з навантаженням на вісь 25 тс та напіввагона-еталона на візках моделі 18-100 з навантаженням на вісь 23,5 тс.» (ДР №0108U003889); «Проведення досліджень та розробка нормативів щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 та перспективними конструкціями проміжних скріплень» (ДР №0108U003893); «Проведення досліджень захисного шару земляного полотна та розробка рекомендацій щодо його оптимальної жорсткості» (ДР №0110U006297); «Проведення досліджень фізико-механічних властивостей матеріалів "відпрацьованого" баластного шару, розробка рекомендацій щодо повторного використання цих матеріалів або їх утилізації» (ДР №0111U010324); «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного та високошвидкісного руху поїздів в Україні» (ДР №0114U002549), автор є керівником та виконавцем і співавтором науково-технічних звітів.

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу

шляхом розробки сучасних методів визначення раціонального, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії.

**Задачі досліджень.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати нормативну базу та результати основних напрямків дослідження параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу.

2. Удосконалити метод визначення напружено-деформованого стану елементів конструкції залізничної колії з урахуванням просторового розповсюдження пружних хвиль при взаємодії колії і рухомого складу.

3. Розробити метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу на основі математичного моделювання роботи колії під впливом рухомого складу.

4. Розробити математичну модель просторових коливань елементів конструкції залізничної колії, як механічної системи, з урахуванням зовнішнього впливу рухомого складу на динамічні деформативні процеси в елементах конструкції залізничної колії із застосуванням положень теорій пружності та просторового розповсюдження пружних хвиль.

5. Провести експериментальну оцінку достовірності розробленої математичної моделі просторових коливань залізничної колії.

6. Визначити вихідні дані для теоретичних досліджень, що пов'язані з параметрами процесу контакту коліс з рейками в залежності від технічного стану рейок з урахуванням горизонтальних переміщень колісної пари при її звивистому русі залізничною колією.

7. Сформувані комплекс оціночних умов за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії, в якості основи класифікації надійності залізничної колії.

**Об'єкт досліджень** – процес динамічної навантаженості конструкції залізничної колії під впливом рухомого складу.

**Предмет досліджень** – параметри взаємодії залізничної колії та рухомого складу залізниць магістрального та промислового транспорту.

**Методи досліджень.** В роботі використано комплексний метод досліджень на основі системного підходу, який включає теоретичну та експериментальну частини. Для проведення теоретичних досліджень у вигляді аналітично-чисельних розрахунків при описі впливу рухомого складу на колію та визначенні напружено-деформованого стану в елементах конструкції колії від взаємодії колії і рухомого складу використано методи математичного та фізичного моделювання, розрахунку елементів конструкції колії на вигин та кручення із застосуванням теорій пружності та розповсюдження пружних хвиль. При описі передачі силової хвилі між елементами механічної системи використовуються методи аналізу і синтезу. Експериментальні дані отримано з використанням методів тензометрії та вимірювання параметрів колії контрольньо-вимірювальною системою з аналого-цифровим перетворенням електричних сигналів. Обробку експериментальних даних проведено на ПЕОМ із застосуванням загально використовуваних методів математичної статистики.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Вперше:

- формалізовані поняття «статична деформативність колії», «динамічна деформативність колії», «деформативна робота колії», «життєвий цикл деформативної роботи колії», які характеризують явища, що відбуваються в елементах та конструкції колії під впливом рухомого складу протягом терміну її експлуатації, що дозволило сформулювати загальні методи оцінки роботи залізничної колії магістрального та промислового транспорту;

- формалізовані додаткові критерії оцінки роботи елементів та конструкції колії під впливом рухомого складу, які, на відміну від існуючих, враховують деформативні властивості елементів та конструкції магістральних та промислових колій і забезпечують необхідні показники довговічності, як на стадії проектування, так і експлуатації;

- розроблено метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу, який на відміну від існуючих дозволяє визначати раціональне, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії;

- отримано аналітичні залежності з визначення особливостей розповсюдження динамічного навантаження, які на відміну від існуючих, враховують два види частот передачі динамічного навантаження, змінну направленість в часі та зв'язок між амплітудами коливань як усередині елементів, так і при переході від одного елемента до іншого, та дозволяють описати процес розповсюдження силової хвилі в конструкції колії магістральних та промислових колій від впливу рухомого складу;

- розроблено математичну модель просторових коливань елементів конструкції залізничної колії як механічної системи, яка відрізняється від існуючих математичних моделей більш досконалим врахуванням фізико-механічних та геометричних параметрів елементів конструкції колії, та дозволяє при моделюванні зовнішньої дії рухомого складу, виконувати дослідження динамічних деформативних процесів системи елементів конструкції залізничної колії із застосуванням положень теорій пружності та просторового розповсюдження пружних хвиль і отримувати результати розповсюдження деформативного процесу колії за часом їх впливу з урахуванням зворотної реакції елементів;

- в якості основи класифікації надійності залізничної колії, розроблено нову систему оціночних умов технічних станів колії за станами надійності з використанням відомих принципів оцінки колії за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії, що дозволяє оцінювати та прогнозувати транспортно-експлуатаційний стан залізничної колії магістрального та промислового транспорту;

- доведена залежність між формою деформації елементів колії під впливом рухомого складу та співвідношенням часу дії навантаження до часу

розповсюдження силових хвиль в елементах за напрямками розповсюдження, що дозволяє пояснити основну відмінність роботи колії промислових підприємств, та встановлювати умови сприймання навантажень елементами конструкції колії;

- досліджено поведінку процесу виникнення та розповсюдження силових хвиль в елементах і конструкції колії і показано можливість спрямованого регулювання процесу деформативності залізничної колії магістрального та промислового транспорту шляхом зміни характеристик матеріалів та конструкції елементів залізничної колії, що дозволяє обирати конструкцію колії або заходи щодо її посилення із забезпеченням певного рівня повноти безпеки та терміну служби.

Удосконалено:

- метод розрахунку елементів конструкції колії на вигин, як елементів певних профілів та довжин з визначеними характеристиками і міжелементними зв'язками, що дає можливість, на відміну від існуючих методів, враховувати хвильовидну природу передачі навантажень при взаємодії елементів конструкції колії, та дозволяє моделювати контактні площини і сили в залежності від тривалості процесу;

- метод розрахунку елементів конструкції колії на кручення, як елементів певних профілів та довжин з певними характеристиками і міжелементними зв'язками, що дає можливість, на відміну від існуючих методів, враховувати дії динамічних сил певної інтенсивності та часу дії, та досліджувати переміщення рейко-шпальної решітки під час руху рухомого складу з урахуванням не тільки навантаження, а і зворотної реакції залізничної колії;

- метод розрахунку характеристик і конструкцій захисного шару, який забезпечує несучу здатність нижньої будови колії, її пружні залишкові деформації в нормативних межах при розв'язанні задачі раціонального устрою залізничної колії, що дає можливість, на відміну від існуючих методів, враховувати напрямок та інтенсивність діючих навантажень, та обирати

характеристики і конструкцію захисного шару з певними дисипативними властивостями.

Отримали подальший розвиток:

- комплекс функціональних моделей елементів конструкції колії на основі використання теорій пружності та розповсюдження хвильового процесу, що дає можливість, на відміну від існуючих моделей, визначати просторовий деформативний стан елементів конструкції колії, встановлювати концентрації напружень і деформацій, прогнозувати подальший розвиток поведіння як окремих елементів, так і конструкції в цілому;

- метод синтезу моделей елементів конструкції колії та рухомого складу на основі використання теорій пружності та розповсюдження хвильових процесів, що дає можливість, на відміну від існуючих методів, передавати силову хвилю від взаємодії коліс з рейками за допомогою імпульсів, та розв'язати проблему відображення фізики процесу при взаємодії колії і рухомого складу з врахуванням часу та інтенсивності силового впливу рухомого складу.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практичне значення отриманих в дисертації результатів досліджень полягає в тому, що запропоновані та обґрунтовані моделі і методи дозволяють у кожному конкретному випадку залежно від конструктивних особливостей устрою колії встановлювати раціональний режим експлуатації даної ділянки, і, навпаки, дає можливість для заданих умов експлуатації визначити за критеріями деформативності та надійності конструкцію колії, або технічні заходи щодо її посилення.

Результати проведених досліджень, можуть бути використані в інженерній практиці: при оцінці рівня вібрацій як конструкції, так і окремих елементів залізничної колії; при проведенні експертиз зі сходу з рейок коліс рухомого складу.

На основі аналітико-числового аналізу розроблених математичних моделей можна: прогнозувати транспортно-експлуатаційний стан залізничної

магістральної та промислової колій; оцінювати ефективність віброзахисних заходів та пружний опір руху поїздів підвищеного навантаження промислових підприємств; обирати матеріали з певними властивостями для досягнення раціонального рівня напружено-деформованого стану конструкції колії та забезпечення певного терміну служби.

Розвинений в дисертації теоретично-експериментальний напрямок дозволяє оцінювати ефективність нових конструктивних рішень залізничної колії, особливо в умовах високих швидкостей руху, а також вплив вібрації на довколишні будівлі, споруди, інфраструктуру.

Використання запропонованих в дисертації теоретичних положень дозволяє удосконалити методи оцінки та прогнозування роботи колії під впливом рухомого складу з урахуванням довговічності та рівня повноти безпеки взаємодії колії та рухомого складу. Та на їх основі створити механізм приведення національних технічних стандартів застосованих на магістральному та промисловому залізничному транспорті в Україні до законодавства Співтовариства.

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами: в начальний процес при викладанні дисциплін «Надійність та технічна діагностика залізничної колії», «Залізнична колія» при підготовці бакалаврів за напрямком підготовки «Залізничні споруди та колійне господарство» (від 19.12.2016 р., 20.12.2016 р.), ПАТ «Укрзалізниця» Департаментом колії та споруд (від 20.02.2017 р.), Львівським науково-дослідним інститутом судових експертиз (від 9.12.2016 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Постановку задачі дисертаційного дослідження виконано сумісно з науковим консультантом. Наукові, методичні і практичні положення, винесені на захист, є авторськими. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: [11, 13, 21, 34, 47] – визначення критеріїв оцінки якості роботи колії, [14, 17, 38] – питання щодо формування показників експлуатаційної надійності роботи стрілочних переводів, [18, 19, 22, 37, 40, 42, 44, 45] – сформульовано принципи вирішення

задач надійності засобами моделювання залізничної колії на основі теорії розповсюдження пружних хвиль, [20, 36, 39, 41] – запропоновано критерій оцінки адекватності обробки експериментальних даних, [35] – розрахунки стійкості безстикової колії, [24, 43] - питання щодо моделювання напружено-деформованого стану в елементах скріплення, [49] – питання адаптації європейських технологій щодо відновлення земляного полотна на залізницях України. Роботи [12, 15, 16, 23, 25...33, 47, 48, 50...54] - надруковані без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основі положення та результати дисертації усно докладалися на: XII-ій, XIII-ій, XIV-ій Міжнародних науково-практичних конференціях по проблемах механіки залізничного транспорту (м. Дніпропетровськ, травень 2008, 2012, 2016 рр.), 69-ій, 71-ій, 74-ій, 75-ій Міжнародних науково-практичних конференціях по проблемах та перспективах розвитку залізничного транспорту (м. Дніпропетровськ, травень 2009, 2011, 2014, 2015 рр.), V-ій Міжнародній науково-практичній конференції по проблемах та перспективах розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту (м. Київ, квітень 2013 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», присвяченій 100-річчю професора М.А. Фрішмана (м. Дніпропетровськ, вересень 2013 р.), Міжнародному технічному семінарі «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії» (м. Львів, березень 2015 р.), VI-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (сmt. Воловець, Закарпатської обл., Воловецький р-н, червень 2015 р.), Міжнародній науково-практичній конференції ім. Сокола Е. М. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд» (м. Львів, вересень, 2015 р.).

В повному обсязі дисертація докладалася на міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна (27.12.2016 р.).

**Відомість про кількість публікацій.** Основні положення дисертації опубліковані у 44-х наукових працях, з них 21 науково-технічна стаття у фахових виданнях, затверджених МОН України [11...21, 23...27, 29, 30...33], дев'ять з яких включені до міжнародних наукометричних баз («Scopus» - [31, 32], та «Index Copernicus» – [23...27, 29, 33]), 2 статті в іноземних виданнях [22, 28], 1 додаткова стаття [39], та 20 тез доповідей на наукових конференціях [34...38, 40...54].

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Повний обсяг складає 328 сторінок друкованого тексту, у тому числі: 47 рисунки, 41 таблиця, список літератури з 391 найменування займає 40 сторінок, додатки викладено на 33 сторінках.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ВЗАЄМОДІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ І РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ЇХ НОРМАТИВНОЇ ОЦІНКИ

### 1.1.Огляд розвитку теоретичних досліджень з визначення параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу

В рамках концепції подальшого розвитку інфраструктури залізничного транспорту визначено послідовний підхід до впровадження комплексного управління надійністю, ризиками, вартістю життєвого циклу на залізничному транспорті. Основна мета концепції - сприяти досягненню загального розуміння і підходу до управління показниками надійності і безпеки об'єктів залізничного транспорту з позицій оцінки ризиків і вартості життєвого циклу. Комплексне управління надійністю, ризиками, вартістю життєвого циклу на залізничному транспорті означає у багатьох відношеннях зміну основних принципів: від оцінки ризиків на основі правил до оцінки ризиків на основі міркувань безпеки; від описових специфікацій вимог до специфікацій орієнтованим на функції; від проектування систем за принципом «знизу вгору» до проектування за принципом «зверху вниз»; від технічного підходу до підходу на основі цілісного, системно орієнтованого погляду. Концепція охоплює всі етапи життєвого циклу об'єктів залізничного транспорту, для розробки спеціальних вимог до надійності і безпеки інфраструктури і рухомого складу залізничного транспорту та для досягнення відповідності цим вимогам. Залізнична колія, як підсистема інфраструктури залізничного транспорту, повинна дотримуватись положень концепції та виконувати свої функції на дотриманні вимог з її надійної та функціонально-безпечної роботи. Надійність - властивість об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх

параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність є комплексною властивістю, яка в залежності від призначення об'єкта та умов його застосування може включати безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість або певні поєднання цих властивостей. Цей узагальнений термін також застосовується для опису властивості готовності та впливаючих на неї властивостей безвідмовності, ремонтпридатності і забезпеченості технічного обслуговування та ремонту.

Функціональна безпека: властивість об'єкта, пов'язаного з безпекою, задовільно виконувати необхідні функції безпеки при всіх передбачених умовах протягом заданого періоду часу.

На надійність і безпеку об'єкта залізничного транспорту здійснюється вплив трьома способами: через джерела відмов, що відбуваються всередині об'єкта на будь-якому етапі життєвого циклу (системні умови), через джерела відмов, що виникають під час експлуатації об'єкта (умови експлуатації), через джерела відмов, що виникають в об'єкті під час проведення технічного обслуговування (умови технічного обслуговування). Дані джерела відмов можуть взаємодіяти.

Надійність залізничної колії магістрального та промислового транспорту характеризує її здатність забезпечити безперервний пропуск поїздів з установленою швидкістю у заданих умовах експлуатації, поточного утримання та й ремонтів.

Функціональна безпека залізничної колії магістрального та промислового транспорту характеризує її здатність забезпечувати безперебійний пропуск поїздів безпечно, тобто без виникнення небезпечний відмов.

За міждержавними нормативами [5] існують вісім станів надійності: справний, несправний, передвідмовний, працездатний, частково працездатний, непрацездатний, небезпечний та граничний. Кожен з цих станів повинен бути встановлений технічною документацією, яка на розглянутий момент відсутня.

За існуючою технічною документацією оцінка стану залізничної колії магістрального та промислового транспорту проводиться за показниками міцності, стійкості, геометричних відхилень та наявністю дефектів. Ці показники не пов'язані між собою та на їх основі без додаткових досліджень розробити зазначену технічну документацію за вимогами надійності неможливо. Окрім того, питання ускладнюється тим, що існують сім категорій колії та при чотирьох з них при капітальному ремонті укладаються старопридатні матеріали і за своїм станом ділянки залізничної колії одразу відносяться до небезпечних або передвідмовних. Отже наведене вище вказує на актуальність додаткових досліджень за вказаним напрямком.

Всі нормативні документи стосовно роботи колії регламентують умови її надійної та функціонально-безпечної роботи. Досвід багаторічної експлуатації залізниць, узагальнений у прийнятих нормах проектування та утримання, доповнюється в процесі розвитку теорії коливань залізничної колії та рухомого складу, де традиційно основна увага приділялася вивченню і оцінці впливу вібрації на елементи рухомого складу та колії. Основними параметрами за якими проводились дослідження та визначались норми проектування насамперед були міцність елементів колії та стійкість рейко-шпальної решітки.

Теорія розрахунків колії на міцність історично розвивалася у двох напрямках: удосконалювалася розрахункова схема і поліпшувалася методика врахування імовірнісного характеру діючих на колію збуджень. У 1831 р. інженер П.П. Мельников книгою «О железных дорогах» робить перший крок у розрахунках колії на міцність - розраховує рейок як балку, що лежить на двох жорстких опорах і завантажену вертикальним навантаженням. У 1888 р. німецький вчений Г Циммерман [55] ускладнює розрахункову схему, розглядаючи рейку як нерозрізну балку, що лежить на чотирьох пружних опорах. У 1903-1906 рр. академік М. П. Петров приймає в розрахунках рейку як балку нескінченної довжини, що лежить на безлічі точкових пружних опор або як балку на суцільній пружній основі [56...58]. Він вперше складає і вирішує диференціальне рівняння рівноваги вертикальних сил, що діють на рейку при

русі, закладає основи динамічного розрахунку колії, розробляє теорію загальних і контактних напружень в рейках.

У 1914 р. на базі робіт Н.П. Петрова, А.А. Васютинського [59], А.А. Холодецького [60], К.Ю. Цеглинського [61] та інших вчених була розроблена перша в історії залізниць Інструкція (Вказівки) щодо визначення навантажень на залізничну колію і швидкостей руху поїздів в залежності від типу верхньої будови колії. Надалі Інструкція по розрахунках колії на міцність удосконалювалася і перевидавалася в 1925, 1931, 1936 і 1941 роках.

Першою книгою за складнішими питань взаємодії колії та рухомого складу є робота Н. П. Петрова, опублікована ним у 1915 р., «Давление колеса на рельсы железных дорог, прочность рельсов и устойчивость пути».

У 1915 р. вийшла книга С.П. Тимошенко [62]. У ній міститься метод визначення напружень і прогинів рейок при русі по них коліс. При цьому на відміну від попередніх робіт Г. Циммермана і Н.П. Петрова, рейка замінюється однорідної балкою, що лежить на суцільній пружній основі. Наводиться розрахунок рейки на вигин від дії зосереджених навантажень і зіставляється з прийнятими раніше методами розрахунку. Потім розглядаються власні та вимушені коливання рейок як невагомою балки, розташованої на суцільній пружній основі. У тій же постановці оцінюється ефект впливу неправильності колеса (повзуни) і рейки (пробуксовини) на напруження в рейках. Також розбирається дія на рейку системи рухомих зосереджених навантажень у разі нехтування масою рейки при розрахунку динамічних напружень. Цій же проблемі присвячена робота про динамічні напруження в рейках [63]. У статті [64] цього ж автора враховується маса рейки при оцінці в ній динамічних напружень. У роботі [65] рейка розглядається як стрижень нескінченної довжини, що знаходиться на суцільній пружній основі. Стаття [66], що була докладом С.П. Тимошенко на II Міжнародному конгресі з прикладної механіки, присвячена розрахунку рейки як стрижня, розташованого на суцільній пружній основі, при впливі бокових і вертикальних статичних навантажень. При крученні рейки її жорсткість визначається за наближеною формулою Б. Сен-

Венана, при цьому автор враховує чисте кручення рейки і вигин головки і подошви рейки. Спільний вигин і кручення рейки розраховуються в припущенні, що рейка покоїться на лінійній пружній основі, яка передає прогин і кручення. Також розглянуті прогини і напруження в рейці від коліс локомотива, визначені з урахуванням динамічних ефектів.

У написаній С.П. Тимошенко статті [67] викладається теорія розрахунку напружень в рейках від рухомого навантаження. При цьому рейка розглядається як довгий стрижень, що лежить на суцільній пружній основі. Аналізується вертикальний вигин рейки при центрально і ексцентрично прикладеній силі, що викликає кручення рейки. Викладена теорія була перевірена в експлуатаційних умовах. Виконано дослідження прогинів і напружень в рейці під дією коліс локомотива ні при статичних, а при динамічних навантаженнях. При цьому спеціально розбираються нерегулярності форми колеса і рейки, а також розриви безперервності у вузлах внаслідок коливань рейки при рухомих навантаженнях і змінної вертикальної компоненти відцентрової сили, викликані противагами і вертикальної складової зусиль від шатуна, прикладених до колеса. Спеціальний розділ присвячений оцінці місцевих напружень в шийці і галтелі рейки під дією центрально і ексцентрично прикладеною вертикальної сили і при боковому навантаженні. Розібрані вигин, кручення й зворотний вигин головки рейки. Оцінені контактні напруження в рейці. Наведено порівняння теоретичних і експериментальних результатів, як в умовах лабораторії, так і експлуатаційних.

У дослідженнях Х. Мелік-Асланова [68], Н.Т Мітюшина [69] були розглянуті загальні питання взаємодії рухомого складу та колії в кривих ділянках колії, методи визначення бокових сил і були зроблені спроби визначити напруження в рейках, що виникають під дією цих сил.

У 1931 р. А. М. Годицькій-Цвірко [70] видає монографію, в якій головну увагу приділяє питанням розрахунку динамічних сил взаємодії.

У 1933 р. виходить у світ російською мовою монографія французького вченого Г. Мар'ї [71] присвячена взаємодії колії та рухомого складу з детальними дослідженнями коливального процесу рухомого складу.

У [72] розглянуто взаємну дію на рейку бокової сили і крутного моменту. Рішення, отримані ними, досить строгі, але громіздкі в практичному застосуванні і не перевірені шляхом зіставлення результатів теоретичних розрахунків з дослідними даними.

Недосконалість теоретичних рішень, різноманіття можливих комбінацій вертикальної і горизонтальної складових тиску колеса на рейку, відсутність пружних характеристик основи змусили ще в 1938 р. поставити питання про оцінку впливу бокових сил на колію за допомогою групи коефіцієнтів, що визначаються в результаті обробки дослідних матеріалів методом математичної статистики. Досвідчені та теоретичні дослідження, проведені О.П. Ершковим [73] дозволили розробити простий у практичному використанні метод розрахунку рейки на горизонтальний вигин і кручення. Розроблений метод заснований на так званому напівроздільному способі розв'язання системи диференціальних рівнянь і дозволяє визначити величину напружень в різних точках рейки, що виникають при дії на рейку зосереджених сил і моментів заданої величини, кут закручування і величину горизонтального прогину рейки, поперечні реакції шпали інш.

Для отримання вертикального модуля пружності підрейкової основи по жорсткості колії і коефіцієнта тертя основи колії М.Ф. Веріго [74] запропонував використовувати петлю гістерезису, отриману при статичному завантаженні колії вертикальним навантаженням.

Наступним великим кроком, узагальнюючим питання взаємодії колії та рухомого складу і практичний метод розрахунку колії на міцність, стала праця колективу авторів М.Ф. Веріго, В.М. Данилова, Є.М. Бромберга, М.А. Фрішмана [75]. Пропонувалося пружні характеристики основи табулювати, дискретні числові значення модуля пружності колії дати в залежності від типу рейок, типу і епюри шпал, роду баластного шару. Їх дослідження стали

основою для створення «Правил производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность», що вийшли в 1954 р. [76]. У 1967 р. вийшла книга М.А. Чернишова [77]. У ній викладені практичні методи розрахунку колії на міцність і стійкість, засновані на результатах теоретичних досліджень в області взаємодії колії та рухомого складу; наведено розрахунки ланкової колії на дерев'яних та залізобетонних шпалах і безстикової колії, а також методи розрахунку на стійкість рухомого складу проти сходу і вкочування гребеня колеса на рейкову нитку.

Технічний розвиток залізничного транспорту призвів до поглиблення досліджень взаємодії колії та рухомого складу. Великий внесок у теорію і досвідчені дослідження в цій області внесли вчені ВНІЗТу і транспортних вузів, насамперед ДПТу (ДНУЗТ), ЛІЗТу (ЛГУПС), МПТу (МГУПС). При цьому широко застосовуються електронні обчислювальні машини, сучасне лабораторне обладнання та випробувальна апаратура, що дозволяє досліджувати складні динамічні процеси взаємодії.

Питання обліку маси колії і сил непружного опору стосовно розрахунків взаємодії колії та рухомого складу представлені в роботах [76, 78-80]. Одним з перших докладні дослідження вертикального модуля пружності підрейкової основи виконано у ВІЗТі К.І. Щепотіним [81]. Він показав, що при дерев'яних шпалах на модуль пружності впливають контактний ефект в зоні контакту шпали з баластом, умови обпирання шпали на баласт (в основному з люфтами в підрейкових зонах), умови формування підрейкової площадки (опуклістю вгору), характер деревини та розміри сусідніх шпал. У результаті залежність прогину рейки від вертикального навантаження виходить істотно нелінійною, оскільки спочатку відбувається вибірка люфтів.

Дослідження ДПТу показали, що крім вибірки люфтів, на величину осідання рейок впливають сили тертя, що виникають у основі [82] і що середня жорсткість колії в інтервалі навантаження 0-16 т, що охоплює весь спектр навантажень рухомого складу, збігається з жорсткістю колії в інтервалі навантаження 4-8 т [83]. Пізніше це ж підтвердили і дослідження ВНІЗТу [84].

Дослідження ДПТУ [85, 86] показали також, що випадковому характеру зміни жорсткості колії по довжині колії притаманні і гармонійні складові. І.С. Леванков [87] рекомендував враховувати наявність гармонійних нерівностей і внутрішнього тертя в основі колії при визначенні динамічного модуля пружності підрейкової основи. Одним з перших, хто запропонував визначати просторові модулі пружності за відповідною жорсткості був О.П. Єршков [88].

Вивченням процесів, пов'язаних з поздовжніми переміщеннями рейок при русі рухомого складу, присвячені роботи В.Г. Альбрехта [89, 90]. Цим же питанням присвячена робота О.Я. Когана [91], де модель колії, являє поздовжні переміщення підшви рейки в кожному поперечному перерізі рейки у вигляді суми деформацій по нейтральній осі рейки, викликаних поздовжньою силою, поздовжніх переміщень точок нейтральної осі рейки, згинальними вертикальними силами, щодо точок підрейкової основи, що виникають із-за скорочення проекції зігнутої осі рейки на її прямолінійну вісь і переміщень підшви рейки за рахунок повороту її перетину.

У 1972 р. М.Ф. Веріго на базі експериментальних і теоретичних досліджень були розроблені пропозиції щодо коригування практичного методу розрахунку колії на міцність [92]. Були внесені зміни щодо правил 1954 р. у розрахункові формули, значення рекомендованих і допустимих напружень. Висунуті пропозиції про необхідність введення різних розрахункових значень модуля пружності підрейкової основи для визначення напружень в рейках і навантажень на рейкову основу з використанням в останньому випадку для їх вибору співвідношень середніх експериментальних значень навантажень на залізобетонні та дерев'яні шпали; про доцільність вибору розрахункових значень модуля пружності рейкової основи в інтервалі навантажень на рейку від 0 до 16 т, а також про проведення зіставлення напружень в земляному полотні при різних схемах спирання залізобетонних шпал на баласт; про вибір розрахункової схеми обпирання та оцінці неточності розрахунку навантажень на шпалу за гіпотезою рівнопружності підрейкової основи.

При спільних випробуваннях ВНІЗТу і ДПТу [93] були уточнені характеристики пружності колії при різних її станах, що виникають при виконанні колійних робіт і супроводжуваних порушенням цілісності баластної призми. В якості уточнюючих факторів з досліджень ДПТу [94] пропонувалося враховувати у розрахунках нерівножорсткість колії по її довжині і роздільний підхід до визначення динамічної сили, що діє від колеса на рейку в кривих і в прямих ділянках колії, а також відмінність у величинах модулів пружності підрейкової основи і модулів, що характеризує опірність основи вигину рейки відповідно вгору і вниз [95].

У 1986 р. вийшло фундаментальне дослідження М.Ф. Веріго і О.Я Когана [96]. У ньому викладено методи дослідження та вирішення основних задач з визначення динамічних сил взаємодії колії та рухомого складу в інженерній постановці з розчленуванням кожної такої сили на окремі складові, і повній постановці - на основі теорії спільних статичних коливань колії та екіпажу (з використанням ЕОМ). Розглянуто процеси уgonу колії, що виникають при русі по ній рухомого складу. Наведено необхідні програми для ЕОМ.

У 1997 р. вийшов міжвузівський збірник, під редакцією Е.І. Даниленко, в якому були представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень взаємодії колії та рухомого складу і динаміки залізничної колії. У результаті досліджень розроблено рекомендації щодо нових конструкцій колії та стрілочних переводів, допустимим швидкостям руху по них, особливостям роботи нових конструкцій колії, а також вдосконаленню методів їх розрахунку. Так у роботах [97, 98] було розглянуто пропозиції щодо вдосконалення розрахунків на міцність і визначення розрахункових параметрів сучасних конструкцій залізничної колії.

У монографії О.Я. Когана [99] висвітлено основні положення, що стосуються коливань і стійкості колії у вертикальній і горизонтальній поперечних площинах під впливом рухомих динамічних навантажень методом частотних характеристик стосовно до лінійних диференціальних рівнянь. Розглянуто питання поздовжніх коливань рейок під рухомим поїздом і при

впливі температури. Наведено також основні принципи формування динамічної системи, що об'єднує в єдине ціле коливання колії як систему з розподіленими параметрами і екіпаж як систему з багатьма ступенями свободи.

У 1999 р. вийшла книга групи авторів під редакцією В.С. Лисюка [84], де показана неприйнятність визначення критеріїв міцності сучасних конструкцій безстикової колії за граничним напружено-деформованим станом матеріалу в точці. Надано обґрунтування необхідності врахування вантажонапруженості при визначенні критеріїв міцності безстикової колії. Представлені теоретичні основи визначення двопараметричного критерію міцності з умови забезпечення заданої надійності безстикової колії, методика розрахунку детермінованого значення поїзних навантажень для визначення критеріїв міцності, прогнозування відмов і довговічності безстикової колії. Були розглянуті питання управління жорсткості і нерівножорсткості безстикової колії, де розкриті наступні питання: фізичний зміст понять жорсткість, піддатливість і пружність безстикової колії і його елементів; основні принципи оптимізації жорсткості безстикової колії; теоретична і експериментальна оцінка ролі земляного полотна у формуванні жорсткості безстикової колії; вплив нерівножорсткості безстикової колії на зміну її напруженого стану по протягу.

У 2000 р. вийшов посібник [100], де в оригінальній доступній формі, з урахуванням сучасного рівня знань розглянуті розрахунки верхньої будови колії на міцність і стійкість під час впливу колісного навантаження.

У наступному році вийшла книга [101], де опрацьовувались питання попереднього видання і викладені теоретичні основи методології створення нової нормативної бази для основних несучих елементів колії за умовою забезпечення її надійності.

У 2004 р. вийшли нові правила розрахунків колії на міцність і стійкість [102]. Основними змінами було відображення характеристик сучасного рухомого складу, наведення приблизних характеристик матеріалів скріплень, шпал та підрейкової основи, зміни значень напружень в елементах колії в залежності від вантажонапруженості, наведено методику визначення стійкості

колії. Основні параметри жорсткості запропоновано визначати за наведеною методикою, через складові жорсткості.

У 2009 р. вийшли «Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії» [103], в яких було зроблено спробу надати залежність використання конструкцій залізничної колії та жорсткості земляного полотна. Але відсутність нормативів за жорсткістю колії не дає змогу використовувати запропоновані рішення. Крім того, повністю відсутні рекомендації улаштування земполотна, якщо модуль деформації ґрунтів, що складають земляне полотно менше за 40 МПа.

## **1.2. Теоретичні методи визначення напружено-деформованого стану магістральної та промислової колій**

**1.2.1. Моделі колії, що використовуються.** Інженерною моделлю верхньої будови колії є балка, що лежить на суцільній основі, пружно пов'язана з нею, при переміщеннях підшви рейки у вертикальному і горизонтальному напрямках. Ця модель була запропонована і досліджена вперше А. Франке [104].

У більшості розрахункових схем і моделей у наукових дослідженнях взаємодії колії та рухомого складу залізнична колія представлена у вигляді двох рейкових балок, що лежать на суцільному пружному півпросторі [62-67, 73-75, 102].

Напівпростір, на який спираються рейки, в переважній більшості випадків приймають працюючим у відповідності з гіпотезою Вінклера-Фусса [105, 106]. Е. Вінклер і Х. Циммерман [55] використовували цю гіпотезу в розрахунках рейки як балки, що лежить на багатьох опорах; в подальшому вона була поширена і на розрахункову схему «балка, що лежить на суцільній пружній основі». Під вінклеровською основою залізничної колії розуміють

основу, у якої силова реакція в кожній точці її поверхні, викликана деформацією основи в цій точці, спрямована назустріч цієї деформації, не залежить від деформацій в інших точках основи.

Іноді беруть розрахункові схеми і моделі, в яких рейка (балка) спирається в окремих точках на велику кількість пружних опор. Оскільки розрахунки системи у вигляді балки, що лежить на окремих пружних опорах, вимагають дискретизації розрахунку (тобто розрахунків для кожної опори), а тому вони значно складніше, ніж розрахунки балок, що лежать на суцільній пружній основі, то в більшості досліджень взаємодії колії та рухомого складу перевага віддається схемою «балка на суцільній пружній основі».

Були зроблені спроби вводити в розрахункові схеми не вінклеровську основу, а інші більш складні моделі, що враховують залежність деформацій основи у даній його точці від деформацій в інших точках, реологічні властивості ґрунтів і т. п. в роботах В.З. Власова, М.М. Леонтьєва, В.Д. Дановича, О.Я. Когана., Н.А. Токмурзіной [107, 99, 108,109]. Однак практика досліджень показала, що введення такого роду моделей основи ускладнює розрахунки колії, не приводячи в розрахунках деформацій до більш точних результатів.

При розрахунках колії на міцність вводяться ряд припущень. Застосування більш точних залежностей істотно ускладнює розрахунок і за наявності припущень навряд чи може бути виправдане. Так розбіжність в результатах розрахунків при досить частому розташуванні опор під рейками та рейок на суцільній основі становить 5 - 7% [110]. Крім того, існуюча методика розрахунку колії на міцність [102] носить інженерний характер.

З урахуванням вище сказаного, основною прийнята модель залізничної колії, що представляє рейку як балку, що лежить на суцільній пружній основі. Для підвищення точності розрахунку на міцність необхідно вдосконалювати схеми, які застосовуються для досліджень взаємодії колії та рухомого складу. Зокрема, необхідно приймати до уваги як пружні і дисипативні, так і інерційні властивості підрейкової основи. Але ця модель виключає вирішення в повній

постановці задач пов'язаних зі швидкісним рухом, надійністю роботи конструкції колії та можливістю прогнозування її станів за часом.

Великий внесок у розвиток теоретичних методів розрахунку верхньої будови залізничної колії внесли М.Ф. Веріго, В.І. Грицик, Е.П. Ісаєнко, О.Я. Коган, Г.М. Шахунянц та інші [111...114]. Підходи, що засновані на механіці суцільних середовищ, зважаючи на їх складності, в цих роботах не використовувалися.

Останнім часом в механіці деформованого твердого тіла були досягнуті значні успіхи у вирішенні динамічних задач, що мають, безсумнівно, важливі практичні доповнення. Фундаментальні основи з дослідження крайових задач динамічної теорії пружності для напівобмеженого середовища, включаючи питання їх розв'язання, застосування принципів випромінювання, закладені в роботах В.М. Александрова, В.А. Бабешко, А.В. Білоконя, Л.М. Бреховських, І.І. Воровича, І.П. Гетьмана, Є.В. Глушкова, А.Г. Горшкова, В.Т. Грінченка, В.В. Калінчука, В.І. Колеснікова, В.В. Мелешко, В.Б. Поручікова, В.М. Сеймова, Л.І. Слепяна, Суворової Т.В., А.Л. Трофимчука, Д.В.Тарлаковського, А.Ф. Улитко, Ю.А. Устинова, Н.А. Шульги [115-134] та інші.

Вивчення контактних задач і процесів збудження і поширення коливань в багатошарових структурах проводилося в роботах В.А.Бабешко, А.О. Ватульяна, Є.В. Глушкової, Н.В. Глушкової, А.Г. Горшкова, В.В. Калінчука, Л.А.Молоткова, Г.І. Петрашеня, Г.Я.Попова, О.Д.Пряхіної, Х.А. Рахматуліна, В.М.Сеймова, М.Г. Селезньова, Т.В. Суворової, А.Н.Трофимчука, Н.А. Шульги, Хаскелл, Томсона, [135-149].

Дослідження динамічної реакції на рухоме навантаження мало розвиток у наступних роботах. Однією з перших робіт, де було розглянуто реакцію одновимірної системи на рухоме навантаження, є робота Д. Ахенбахом [150], який розглянув динамічну реакцію одновимірної балки Тимошенко, що лежить на пружній основі. У 1970 році А.П. Філіппов [151], а потім і Л. Фрібе [152] опублікували свої монографії, присвячені аналізу таких систем.

Пізніше дослідники почали розглядати більш складні періодично неоднорідні системи, що враховують шпальну структуру колії. У 1981 році Л. Жезекюль [153] опублікував роботу, де вперше було розглянуто реакцію балки, що лежить на періодичних еквідистантних опорах, на рух навантаження. Після цього було проведено велику кількість досліджень, присвячених аналізу як континуальних, так і періодичних одновимірних систем. Особливо слід виділити в цьому ряді робіт публікації Р. Богача, Т. Кржізінського і К. Поппа [154, 155], а також роботи П.М. Білоцерківського [156...158].

З середини 90-их років почалися масові дослідження тривимірних моделей залізничного полотна, що було обумовлено бурхливим розвитком високошвидкісного залізничного транспорту. Як виявилось, поверхневі хвилі в ґрунті, що викликані такими поїздами, чинять істотний вплив на динаміку рухомого складу, та одномірні моделі показали себе неспроможними для опису руху поїздів з великими швидкостями.

До цього були проведені лише поодинокі дослідження тривимірних моделей рейкової колії. У 1966 році Д. Лансінг [159] опублікував роботу, присвячену руху точкового навантаження по поверхні пружного півпростору, і ще раніше, в 1961 році, А.П. Філіппов [151] розглянув реакцію балки Бернуллі-Ейлера, що лежить на пружному півпросторі, від рівномірно рухомого навантаження. А.П. Філіппов, зокрема, показав, що реакція балки істотно зростає, якщо швидкість навантаження наближається до швидкості поширення хвиль Релея в ґрунті. У 1975 році Д. Лабра [160] продемонстрував, що зростання реакції може мати місце і при більш низьких швидкостях, якщо врахувати осьові напруження в рейках, що пов'язані з температурним розширенням.

Далі дослідження в цьому напрямку помітно активізувалися, і за декілька років було опубліковано цілий ряд статей, де розглядалися різні тривимірні моделі рейкової колії [161...169]. Особливо слід відзначити огляд по відомим до того часу моделям залізничного полотна К. Кноте [168], опублікований в 1999 році.

Математичному моделюванню удару присвячені наступні роботи.

Перші роботи в області удару відносяться до 17 століття, це дослідження Марци у 1639 р. «О соотношении движений или правила соударений», Гюйгенса «О движении тел под влиянием удара» у 1703 р., Валліса «Механика или геометрический трактат о движении» 1671р, Ньютона «Математичні начала натуральної філософії» у 1686 р. Дані дослідження базувалися на моделі удару абсолютно твердих тіл з використанням гіпотез про кількісні значення швидкостей тіл після удару. Значення швидкостей тіл після удару визначалися або з припущення про збереження кінетичної енергії тіл, що зіштовхуються (модель Марци - Гюйгенса), або з припущення про рівність швидкостей тіл після удару (модель Валліса), або з припущення про пропорційність відносних швидкостей тіл, що зіштовхуються, перед ударом і після удару (модель Ньютона).

Досить багато робіт вийшло в СРСР у 60-70-ті роки, присвячені експериментальному і теоретичному підходу до вирішення задач удару. Роботи В.Н. Кукуджанова і В.І. Кондаурова [170, 171] присвячені чисельному розв'язанню неодномірних задач динаміки деформованого твердого тіла, а також поширенню пружно-пластичних хвиль в стержні з урахуванням впливу швидкості деформацій. Побудована повна система диференціальних рівнянь пружно-пластичної течії з кінцевими деформаціями для матеріалів диференціального типу. Розглядаються деякі питання вибору чисельних схем - мережевих методів, характеристичних і мережево-характеристичних методів, метод кінцевих елементів.

У роботах В. Л. Баранова [172-174] були розглянуті проблеми втрати поздовжньої стійкості довгих стержнів при їх високошвидкісному ударному стискаючому навантаженні. Сформульовано необхідні і достатні критерії втрати стійкості.

Варто відзначити роботи І.А. Кійко [175], присвячена впливу осьової ударного навантаження на циліндричну оболонку. У цих роботах досліджуються форми прогинів оболонки залежно від навантаження, причому

останнє вважається більше, ніж верхнє критичне. Рішення порівнювалось з результатами експериментів, отриманими за допомогою високошвидкісної камери.

Також цікавою є робота А.П. Малишева [176], в якій досліджуються хвильові процеси в пружній тонкостінній циліндричній оболонці при раптовому прикладанню сили до її торця. Для вирішення була використана безмоментна теорія оболонок.

У роботах В. В. Зуєва [177...179] розглядається проблема математичного моделювання нелінійних динамічних процесів в деформованих твердих тілах. В якості базових визначальних співвідношень використовуються співвідношення теорії пластичності, що сформульовані в просторі повних деформацій і дозволяють описувати ефекти зміцнення і знеміцнення, незворотні об'ємні деформації. Узагальнене співвідношення Мізеса-Шлейхера, коефіцієнти якого залежать від рівня досягнутих необоротних деформацій, розглядається як умова текучості.

Багато робіт, присвячених даній тематиці, видаються у США і Європі [180...182], це насамперед вузькоспеціалізовані дослідження, що використовують найчастіше, звісно-елементну постановку процесу взаємодії і які проводяться з використанням класичних математичних моделей, застосованих у звичайно - елементних пакетах ANSYS, DYNA 3D, Nastran [183...185].

Основний внесок у розвиток математичних методів розв'язання динамічних задач теорії пружності і в'язкопружності внесли вчені: Ж.Д. Ахенбах, В.В. Болотін, Б.Ф. Власов, В.З. Власов, Е.І. Гріголюк, Б.Г. Коренєв, А. Ляв, Г.І. Петрашень, Г.І. Пшеничнов, І.Г. Селезов, І.Г. Філіппов [144, 186...203] та інші.

Моделювання основи колії.

Моделювання ґрунтового масиву зазвичай засноване на його уявленні як суцільного середовища, що володіє особливими фізико-механічними властивостями. Структурно виділяються три групи ґрунтів - піски, глини та

скельні породи. Важливе значення має також ступінь водонасичення середовища, яка грає істотну роль в несучій здатності ґрунтової основи. У переважній більшості таких досліджень ґрунт розглядається як однофазне середовище [196].

Однією з поширених в інженерній практиці є модель пружного деформування ґрунту, в якій ґрунт розглядається як суцільне, ізотропне, лінійно-деформоване тіло. Завдяки своїй простоті і можливості використання добре розробленого математичного апарату опору матеріалів та теорії пружності, пружна модель широко використовувалася для опису напружено-деформованого стану різних ґрунтів.

Модель пружного ґрунтової основи, що бере початок з роботи Е. Вінклера про зв'язок між тиском і осадкою, в подальшому була розвинена в роботах багатьох досліджень. Якщо в роботі К. Терцагі [204] були закладені основи оцінки деформації ґрунтів і осідання фундаментів, то різні підходи до розрахунку балок і плит, що лежать на вінклеровській основі отримали значний розвиток у працях М.Ю. Абелева, Ю.М. Абелева, В.З. Власова і Н.Н. Леонтєва, С.С. Вялова, Н.М. Герсєванова, М.Н. Гольдштейна, М.І. Горбунова-Посадова, Б.І. Далматова, О.Г. Денисова, Н.Я. Денисова, К.Є. Єгорова, Б.М. Жемочкіна і А.П. Синицина, Н.Н. Іванова, О.М. Крилова, Н.Н. Маслова, Н.П. Пузирєвського, Є.Г. Соловйова і В.Г. Немова, І.Г. Терегулова, В.А. Флоріна, Н.А. Цитовіча [205...233] та інш.

Наприклад, Н.П. Пузирєвський [224] запропонував оригінальний метод використання теорії пружності, що дозволив розробити загальну теорію напруженості землистих ґрунтів, і дав рішення задачі про величину тиску в основі споруди, що відповідає початку виникнення під краєм фундаменту зон пластичного стану.

Н.М. Герсєванов [210] запропонував розглядати три основні фази напруженого стану ґрунтів під фундаментами: фазу ущільнення, фазу зрушень (пластичної течії) і фазу випирання. Далі він отримав для крайового навантаження значення, що відповідає початку виникнення фази зрушень у

грунтах, практично рівну допустимому тиску на ґрунт і показав, що застосування теорії пружності до глин і дисперсних пісків настільки ж є правомочним, як і застосування її до сталі. В.А. Флорін [227...229] встановив співвідношення розмірів областей пластичних зон у ґрунті з розмірами споруди, що визначає умови застосування рішень теорії пружності до розрахунку основ.

Дослідження властивостей ґрунтів з анізотропних матеріалів наведено у роботах [234...239]. Однак пружні моделі, розглянуті в цих та інших роботах, описують властивості ґрунту простими схемами, та не охоплюють всього різноманіття його властивостей, складну нелінійну залежність між осіданням основи і навантаженням, зміни цієї залежності в процесі навантаження і т.п.

Другий підхід в оцінці напружено-деформованого стану ґрунтів засновано на теорії граничної рівноваги. У ній використовується жорстко-пластична модель, в якій вважається, що до деякого рівня напруженого стану тіло залишається недеформованим, а після досягнення компонент тензора напружень граничної поверхні починається необмежене його деформування. Така модель, звана жорстко-пластичною моделлю, не враховує пружних деформацій. Це допустимо, наприклад, у тих випадках, коли робота внутрішніх сил на пластичні деформації набагато більше роботи цих сил на пружні деформації. Така особливість жорстко-пластичного тіла широко використовується для розробки методів розрахунку граничного навантаження в ґрунтах, де є велика різноманітність механічних характеристик.

Основоположними в теорії граничного стану є роботи А.А. Гвоздьова [240], який сформулював і обґрунтував екстремальні принципи, що дозволяють оцінювати граничне навантаження. Основам теорії пластичного руйнування присвячені роботи С.М. Фейнберг, Д. Друккера, В. Прагера та Х. Грінберга, Р. Хілла [241...243] та інш.

Дослідження з теоретичних питань і методах розрахунку конструкцій при різних умовах текучості відображені в ряді монографій і оглядів: Н.І. Безухова, А.А. Гвоздьова [240], Г.А. Генієва, В.М. Кіссюка і Г.А. Тюпіна, І.І. Гольденблат

і В.А. Копнова, М.І. Ерхова, В.Г. Зубчанінова, Д.Д. Івлєва, А.А. Ільюшина, Я.А. Каменяржа, Л.М. Качанова, Ю.В. Немирівського і В.С. Резнікова, В. Ольшака, З. Мруза і П. Пежіної, В. Прагер та Ф. Ходжа, А.М. Проценко, І.Г. Терегулова, Р.А. Каюмова і Е.С. Сібгатулліна, А.А. Чіраса [244-259] та інш.

Недоліком цих методів є те, що інформація про шукані поля, знайдені за допомогою статичної теореми, не використовується при оцінці граничного навантаження за допомогою іншої, кінематичної теореми, оскільки для побудови поля швидкостей не обов'язково знати поля напружень, і навпаки.

У роботах Р.А. Каюмова та інш. [260-265] викладається метод варіації пружних характеристик, який позбавлено цього недоліку і дозволяє за допомогою одного і того ж поля переміщень деякої псевдопружної задачі визначати і верхню, і нижню межі граничного навантаження при довільних умовах текучості.

Незалежно від цих авторів Ю.Л. Рутманом [266] була розроблена аналогічна методика розрахунку для умови Мізеса.

Загальною теорією граничного напруженого стану ґрунтів, починаючи з постановки задачі і закінчуючи розробкою математично строгих рішень, займались багато вчених [267...275], і згодом, забезпечена зручними графіками і таблицями, спрощена теорія мала досить широке застосування.

Другий напрямок ставить за мету побудову строгої теорії граничної рівноваги, що дозволяє розглядати різні задачі і знаходити відповідні сітки ліній ковзання. Він веде початок від роботи Ф. Кеттера [276], який склав систему рівнянь граничної рівноваги сипучого середовища, а потім перетворив її до криволінійних координат. Великий вплив на подальший розвиток цієї теорії надано вченими в роботах [277...280]. Основною перевагою цієї теорії є те, що характеристики рівнянь, що описують поля напружень і швидкостей при плоскому деформованому стані, збігаються, і області, що знаходяться в граничній рівновазі, можуть бути визначені однозначно, але розрахунки, виконані відповідно за цією теорією, практично завжди дають занижений коефіцієнт стійкості.

Крім зазначених можливий і третій підхід у визначенні граничного навантаження та розрахунку ґрунтів, заснований на більш точній моделі деформування ґрунту з урахуванням як пружних, так і пластичних деформацій і деформацій повзучості. Крім того, в ньому з'являється можливість врахування зміни міцності ґрунту за часом.

Перші роботи з теорії пластичності пов'язані з іменами Б. Сен-Венана, який розглянув рівняння плоскої деформації, і Леві, що склав рівняння для тривимірного випадку та призвів рівняння плоскої задачі до лінійної форми.

Теорія повзучості як розділ механіки тіла, що деформується, була сформована порівняно недавно. Дослідження в області пружнов'язких тіл виконані в роботах А.Ю. Ішлінського [281], Качанова Л.М. [282], А.Р. Ржаніцина [283], Ю.М. Робітнова [284], Н.Х. Арутюняна [285], А.А. Гвоздьева [240], Г.М. Маслова [280], А.А. Ільюшина [251].

У подальшому експериментальними дослідженнями повзучості, релаксації напружень і тривалої міцності ґрунтів займався С.Р. Месчян [286...290], який у книзі [290] узагальнив результати дослідження повзучості і тривалого опору зрушенню глинистих ґрунтів при одновимірному ущільненні і простому зсуві з урахуванням ряду факторів, що мають важливе наукове і практичне значення для вирішення конкретних задач.

Дослідження повзучості ґрунтів також висвітлено в роботах С.С. Вялова [291], Ю.К. Зарецького [292...294], С. Муроями і Т. Шіботи [295], Є.П. Шушеріної [296] і Н.К. Пекарської [297]. Ґрунтовні дослідження тривалої міцності підтвердили застосовність до ґрунтів класичної схеми зниження міцності в результаті повзучості.

З іншого боку, міцність ґрунту безпосередньо пов'язана зі зміною його коефіцієнта зчеплення і кута внутрішнього тертя. Перший з них характеризує міцність ґрунтового середовища на зріз за відсутності напружень стиску, а другий - підвищення міцності на зрушення при всебічному стиску. Ці величини визначаються експериментально для кожного ґрунту при проведенні геологічних вишукувань і практично у всіх розрахунках вважаються

константами для даного ґрунту. Однак виявилось, що це не так. Наприклад, експериментальні дослідження міцності і деформативності глинистих ґрунтів у тривалих умовах тривісного осі-симетричного стиску, проведених І.Т. Мірсяповим та І.В. Корольовою [298] показали їх істотну зміну (у межах 60% для коефіцієнта зчеплення і 48% для кута внутрішнього тертя).

На основі експериментів Є.П. Шушерина і С.С. Вялова [296] показано, що зменшення обсягу щільного ґрунту відбувається в результаті скорочення кількості дефектів - мікротріщин, а збільшення обсягу - в результаті їх розвитку.

Першу математичну модель ділатансії запропонував Осборн Рейнольдс, та надалі М. Рейнер [299...301] для рідини, в якій зв'язок зсуву з об'ємом вводився за рахунок тензора нелінійної в'язкості.

Г.І. Ломізе [302] на основі дослідів показав залежність коефіцієнту ділатансії від траєкторії навантажень. С. Мурояма і Т. Шібота [295], а також Г.І. Ломізе [302] отримали залежності об'ємної деформації від інтенсивності дотичних напружень. С.Е. Городецький [303] отримав криві об'ємної повзучості при трьохосному стиску.

У всьому світі проводяться численні теоретичні та експериментальні дослідження з вивчення взаємодії основи і ґрунту. Аналітичним шляхом вирішено вкрай обмежене число таких завдань. Для реальних же граничних умов, характерних для задач фундаментобудівництва та гірничої справи, а тим більше в неоднорідних середовищах, аналітичне рішення практично недосяжно. Тому переважна більшість сучасних досліджень у цьому напрямку проводиться з використанням чисельних методів, що дозволяють отримувати рішення при як завгодно складних граничних умовах. Зусиллями дослідників безперервно розширюється і діапазон реалізованих в програмах механічних властивостей ґрунтів.

Серед різних чисельних методів механіки суцільних середовищ найбільш досконалим і широко застосовуваним є метод кінцевих елементів (МСЕ). Причина настільки великої популярності МСЕ полягає в його алгоритмі і

доброю сумісністю з системами автоматичного проектування. Поява високопродуктивних комп'ютерів призвела до значного збільшення досліджень, присвячених фізично нелінійним задачам пластичної зміни, граничного стану та інш. Ідеї наближених методів обчислення, на яких базується МСЕ, були сформульовані у працях Д. Аргіріса, М. Тернера, Р. Клафа. Розвиток методу отримано в роботах О.К. Зенкевича [304], Д. Одена Д. Кей [305], Л. Сегерлінда [306], Д. Норрі. і Ж. Фріза [307] та інш. З тих пір популярність цього методу дуже швидко виросла в різних галузях науки і техніки. Значний внесок у теорію МСЕ внесли автори В.А. Постнов і І.Я. Хархум [308], Л.А. Розін [309], І.Ф. Образцов [310].

В даний час існують багато розрахункових комплексів і програм, заснованих на МСЕ. Найбільш відомими і універсальними з них є розрахункові комплекси ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, Nastran, Plaxis, ПК ЛІРА та інш. Також є безліч програм, призначених для вирішення спеціальних задач або проблем вузької спрямованості. Вони дозволяють вести розрахунки складних споруд на вплив різних навантажень, у тому числі вирішувати задачі по визначенню напружено-деформованого стану систем з урахуванням взаємодії ґрунту і конструкції. Однак вони мають і недоліки. Зокрема, в розрахункових комплексах при обліку взаємодії ґрунту та конструкції використовуються тільки ті моделі, які закладені спочатку (пластичність, повзучість, ділатансія та інш. особливості ґрунтів), але не враховується зміна міцності і пористості ґрунту в процесі деформування. До того ж в існуючих розрахункових комплексах відсутня можливість врахування всіх визначальних фізичних параметрів системи конструкції ґрунту одночасно. У роботі [311] досить ефективно використовується поєднання МСЕ та теорії граничної рівноваги. Розроблена програма CIRCLE реалізує цей підхід і забезпечує автоматичний пошук поверхні з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості.

У роботі Д.В. Бережного, А.І.Голованова, В.М. Паймушіна, І.М. Сидорова [312...314] розроблена звичайно-елементна методика розрахунку водонасиченого пористого середовища, що деформується при взаємодії з

конструкціями. Робота І.П. Бойко, В.А. Сахарова [315] присвячена дослідженню напружено-деформованого стану ґрунтового масиву поблизу існуючих будов, в яких наведено результати вирішення двовимірних і тривимірних лінійних і нелінійних задач взаємодії фундаментів сусідніх будинків із застосуванням чисельних методів на базі системи "VESNA". Використовується теорія пластичної течії, неасоційований закон деформування ґрунтів основи і модифікований критерій Мізеса-Губера-Боткіна. Також враховується конструктивна нелінійність системи "основа-фундамент-конструкція". Результати рішення модельних задач порівнюються з коефіцієнтом жорсткості основи і моделі нелінійно-деформованого шаруватого ґрунтового масиву.

Роботи з вивчення динамічних процесів ведуться в різноманітних напрямках. Теоретичну частину, зазвичай, розробляють науковці фізико-математичного напрямку, а науковці технічного напрямку поширюють розробки з врахуванням особливостей цього процесу. В роботі [316], розроблено алгоритм побудови хвильових полів, які генеруються рухомими осцилюючими навантаженнями в гетерогенному шаруватому півпросторі і пакеті шарів. Виконано натурний експеримент реєстрації хвильових полів, які генеруються в основі магістралі поїзного навантаження, що підтвердив висновки теоретичних досліджень. Але складність полягає в тому, що збуджувані хвильові поля несуть в собі інформацію, з одного боку, про інтегральні параметри рухомого складу, а з іншого – про параметри баластної призми і ґрунтового середовища, тому вони дають змогу аналізувати характеристики на основі порівняння, тобто виконувати якісний аналіз.

В роботі [317] досліджується стійкість коливань двомасового осцилятора, який рівномірно рухається по балці моделі Бернуллі-Ейлера, що лежить на в'язко-пружному півпросторі. Недоліком є те, що вводиться еквівалентна жорсткість півпростору і завдання зводиться до вирішення задачі про коливання балки на одновимірній основі, оскільки деформативні характеристики колії є дуже слабким місцем. Хоча принципово важлива

відмінність полягає в тому, що еквівалентна жорсткість півпростору не є константою, а залежить від частоти і хвильового числа в балці.

Дуже багато досліджень присвячені впливу динамічних коливань колії на коливання ґрунтів та споруд, що знаходяться поруч. Вони, зазвичай, базуються на експериментах. Прикладом з визначення несучої здатності ґрунтів, може бути робота [318], де виконані польові, лабораторні та теоретичні дослідження. У роботі виконані розрахунки, на основі яких розроблена методика розрахунку та прогнозування несучої здатності земляного полотна, відсипаного барханними пісками, що сприймають вібродинамічне навантаження. Також прикладом робіт такого напрямку є робота [319], де розглянуто динамічні навантаження протягом сезонів та встановлено різницю характеристик вказаного процесу при різних станах ґрунтів. Перевагою таких робіт є різноманітні дослідження поведінки конкретних ґрунтів, але основним недоліком є неможливість розповсюдження отриманих результатів на основі з інших ґрунтів, інші умови експлуатації та інші кліматичні зони.

У зв'язку з постійною потребою збільшення ваги вантажних поїздів, швидкостей пасажирських поїздів та пропускної спроможності залізничних ліній, а також відсутності вільного простору в населених пунктах, підвищення інтенсивності залізничного транспортного шуму і вібрації може стати спільною екологічною проблемою в майбутньому. Тому дуже багато досліджень виконується в цьому напрямку. Так, в роботі [320] розглянуто цю проблему в рамках міських хорватських трамвайних та залізничних ліній. В роботі [321] описано досягнення щодо зниження шуму та вібрації, що виконуються за програмою в Німеччині. В роботі [322] описано досвід гонконгських залізничних мереж, протяжність яких сягає 211 км щодо планування та контролю за шумом у великих містах. Ці роботи не дають удосконалення для розрахунку поширення коливань від дії рухомого складу, але значно розширюють інформацію стосовно цих процесів та їх вплив на оточуюче середовище. Крім того, на їх підставі формуються критерії шуму та віброзахисту.

Проблему забезпечення надійної роботи залізничної колії з точки зору обробки існуючої інформації та прогнозування на її підставі імовірності ризиків розглянуто в роботі [323]. Запропоновано підвищення коефіцієнта готовності колії за рахунок зниження ризиків, що ґрунтується на підвищенні обізнаності та підготовленості до подій. Але враховано всі майбутні ризиковані події тільки за спостереженням виходу елементів верхньої будови колії та зміни експлуатаційних умов. Для прогнозування необхідно враховувати поведінку й нижньої будови колії, адже вона має найбільший термін служби, ніж всі елементи залізничної колії. Отже, прогнозування буде мати похибки, якщо не забезпечувати однаковий стан земляного полотна при подальшій експлуатації, але напрям сучасно розширює поняття працездатного стану колії.

При вивченні коливань системи «екіпаж-колія» сформовано два напрями досліджень: вивчення коливань рухомого складу та вивчення коливань колії. Дослідження коливань з конструкцій верхньої та нижньої будови колії зводяться до вивчення коливань рейки при певних впливах рухомого складу та певних характеристиках підрейкової, а іноді підшпальної основи. Результатами таких досліджень є напружено-деформований стан, що характеризує міцність та витривалість. Коливання рухомого складу вивчаються більш широко, але при їх дослідженні коливання системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії подають як набір збуджуючих коливань. Функції, що описують ці коливання, навіть не мають чіткої залежності від характеристик елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії.

Існує декілька основних теоретичних моделей для дослідження зазначених проблем: балка на півпросторі, балка на двошаровій основі, конструкція колії за канонами методу скінченних або граничних елементів. Так, в роботі [324] розглянуто піддатливість залізничних ліній за допомогою моделі балки на півпросторі та за допомогою методу скінченних елементів. У роботі [325] розглянуто підхід до визначення питання щодо забезпечення стійкого руху нетрадиційного екіпажу. Монографія [326] розкриває основні проблеми та шляхи їх рішення роботи підвісних монорейкових доріг при підготовці запасів

вугілля до очисної виїмки в умовах шахт Західного Донбасу. В роботі [327] продовжено напрямок щодо розвитку моделювання для аналізу роботи елементів колії при спільній дії вертикальних і горизонтальних поздовжніх сил. У роботі [328] порівняно розрахунки вібрацій у метрополітені, виконаних для моделі, що описана за методом граничних елементів, та за запропонованим методом «труба в трубі». У запропонованому методі тунель стіни та земля, що оточує її, моделюються у вигляді двох концентричних труб з використанням засад теорії пружності континууму. Роботи [329, 330] є продовженням напрямку твердотільних досліджень, що розвинуті завдяки удосконаленню характеристик, отриманих за експериментами та використанням методу скінченних елементів. В роботі науковців університету Лафборо (Великобританія) [331] зібрано аналіз отриманих емпіричних даних та надано оцінку моделей, що застосовуються при розрахунку коливань в основі колії від впливу рухомого складу, та рекомендації щодо подальшого коригування моделей.

В роботі [332] виконано чисельне динамічне моделювання, що поєднало два методи: тривимірної моделі руху вагонів та методу кінцевих елементів. Цей прийом вирішив проблему з визначення величин навантажень на колію.

Завершуючи огляд розроблених моделей доходимо висновку, що основними напрямками розвинення моделювання є удосконалення моделей на базі МСЕ та моделей змішаного типу, в яких вплив рейко-шпальної решітки моделюється за допомогою динамічної задачі про контакт деформованих прямокутних брусів (шпал) і двох рейкових ниток, представлених пружними нескінченними тривимірними брусами криволінійного обрису. Нескінченна система прямокутних брусів, у свою чергу, контактує з баластною призмою, що лежить на пружній шаруватій основі. До верхньої частини тривимірних брусів криволінійного перерізу прикладене рухоме осцилююче навантаження, що відображує проходження рухомого складу. Іншим способом завдання зовнішнього впливу є використання реальних спектрів переміщень, отриманих в результаті обробки натурних експериментальних даних. Нескінченна система

деформованих прямокутних брусів контактує з тривимірною смугою трапецеїдального перерізу кінцевих поперечних розмірів, розташованої на шаруватій основі. Основа моделюється багат шаровим півпростором, що складається з шарів і підстилаючого півпростору з плоско-паралельними межами розділу. Умови контакту шарів - повне або часткове зчеплення вздовж усієї границі або її частини.

Якщо в МСЕ дійсно розглянуто трьохмірну систему, то в другому типі моделей рішення зводиться до одно- або двомірних задач.

Загальним недоліком цих моделей є те, що вони не враховують час поширення навантажень та реакції контактуючих елементів, та як наслідок, перерозподіл поширення навантажень в конструкції, що виключає вирішення задач пов'язаних із надійністю роботи конструкції колії та можливістю прогнозування її станів за часом.

**1.2.2.Урахування силового впливу.** Під впливом вертикальних і горизонтальних сил рейкова колія відчуває складні просторові деформації (тобто зміну форми) і напруження. Вертикальний динамічний тиск коліс рухомого складу на рейки складається з великої кількості сил, що діють одночасно або різночасно. Якщо враховувати всі без винятку вертикальні динамічні сили, то це тільки ускладнить вирішення задачі про визначення вертикальних динамічних сил, переданих колесом рейці, не підвищить істотно точність цього рішення.

Тому в розрахунок [102] приймають тільки головні, найбільші за величиною впливові сили і нехтують або враховують непрямим шляхом решту, малопомітні сили. До числа головних сил, що враховуються в розрахунках вертикального динамічного тиску коліс на рейки, відносять: вагову складову тиску колеса на рейку; сили інерції безпружинних мас, обумовлених плавної безперервної нерівністю на колесі; сили інерції безпружинних мас, обумовлених ізольованою нерівністю на колесі; сили інерції безпружинних мас,

обумовлених ізольованою нерівністю на колії; сили інерції безпружинних мас, обумовлених безперервної плавною нерівністю на колії; сили тиску ресори на колесо, зумовлені коливаннями надресорних будов.

У розрахунках не враховують вітрове навантаження, сили інерції безпружинних мас, що виникають через зміни пружних властивостей колеса і рейки уздовж поверхні кочення, випадкові сили інерції безпружинних мас від наявності на поверхні кочення колеса і рейки чужорідних тіл і т.п.

Всі сили, складові вертикальні тиску коліс рухомого складу на рейки, і їх поєднання носять імовірнісний характер.

Під рухомими поїздами, крім вертикальних сил, виникають ще й горизонтальні поперечні і поздовжні.

До горизонтальних поперечних сил відносяться бокові сили, пов'язані з вилянням і качкою рухомого складу, використанням рекуперативного гальмування, в кривих малого радіусу - рамні сили, сили натискання гребеня на головку рейки і сили тертя, що виникають при поперечному ковзанні коліс по рейках. У кривих ділянках колії виникають додаткові поперечні горизонтальні сили, пропорційні величинам непогашеного поперечного прискорення.

Поздовжні сили - сили угону і температурні сили. З багатьох факторів, що викликають угон колії, найбільш істотними є: опір руху поїздів, переміщення рейок щодо опору внаслідок вигину рейок під рухомим навантаженням, гальмування рухомого складу, струшування рейок від ударів в стиках. Температурні сили виникають при зміні температури рейок у порівнянні з температурою їх закріплення.

Вплив горизонтальних поперечних сил описані в моделі С.П. Тимошенко [66]. Процеси, пов'язані з поздовжніми переміщеннями рейок при русі рухомого складу, розглянуті в моделях В.Г. Альбрехта [89, 90], О.Я. Когана [333].

У практичних розрахунках на міцність [102] рейка розглядається як нескінченна балка на пружній основі, враховуються тільки вертикальні сили, прикладені по осі симетрії рейки. Горизонтальні поперечні сили і

позацентричний додаток вертикального навантаження враховується за допомогою емпіричних коефіцієнтів. Горизонтальні поздовжні сили враховуються шляхом належного вибору допустимих напружень. Для визначення розрахункової динамічної сили, що діє на колію, виконується статистичне підсумовування випадкових складових: статичної колісної навантаження, додаткової сили від коливань надресорної будови екіпажу, інерційного зусилля за рахунок руху колеса по плавній нерівності колії, сили інерції надресорної маси екіпажу, колесо якого має ізольовану або безперервну нерівність.

Всі зазначені вище елементи моделі колії за вертикальними, горизонтальними, поперечними і поздовжніми деформаціями можуть бути суміщені в загальну для них модель колії.

**1.2.3. Нормативна оцінка параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу.** В існуючій нормативній документації відсутні розподілення технічних станів елементів колії за станами надійності в процесі експлуатації. Але всі елементи конструкції колії мають вимоги стосовно опису технічних станів, що відносяться до справного та не працездатного стану [334, 335]. Тільки рейки мають нормативи зі зносу, дефектів та деформацій [334], при яких вони можуть бути віднесені до інших станів надійності [5] в процесі експлуатації. Але за технічними станами, що описані у [334...336], якісні стани життєвого циклу роботи колії можуть бути розподілені за станами надійності.

В існуючих нормативних документах певна конструкція колії характеризується несучою здатністю елементів колії, стійкістю рейко-шпальної решітки та нижньої будови колії й наявністю дефектів і пошкоджень в елементах колії. Система технічного обслуговування та ремонтів колії певної категорії колії характеризується певними геометричними відхиленнями та дефектами елементів.

Кількісний стан життєвого циклу роботи колії характеризують умови міцності рейкової колії, що оцінюються насамперед за міцністю основного несучого елемента верхньої будови колії, тобто за міцністю рейок, шляхом порівняння розрахункових напружень у рейках з допустимими значеннями.

За напруженнями, що виникають в інших елементах верхньої будови колії, тобто за напруженнями в шпалах, баласті, на основній площадці земляного полотна – оцінюється несуча здатність і здатність до нормальної експлуатації конструкції верхньої будови колії в цілому.

В якості оціночних критеріїв міцності ланкової колії в інженерному методі розрахунку використані [102]:  $[\sigma_p]$  - допустимі напруження в кромці подошви рейки, зумовлені її вигином і крученням внаслідок вертикального і поперечного горизонтального впливу коліс рухомого складу;  $[\sigma_{ш}]$  - допустимі напруження на зминання в дерев'яних шпалах (прокладках на залізобетонних) під підкладками, усередненні за площею підкладки;  $[\sigma_6]$  - допустимі напруження стиску в баласті під шпалою в підрейковій зоні;  $[\sigma_3]$  - допустимі напруження стиску на основній площадці земляного полотна в підрейковій зоні.

Розрахунок безстикової колії так само засновано на неперевищенні допустимого напруження сумарним напруженням, що виникають в рейці від впливу рухомого складу з урахуванням коефіцієнта запасу міцності і температурних напружень, що виникають в результаті зміни температури рейок у порівнянні з температурою закріплення пліті [102, 337].

Таким чином, обмеження найбільших допустимих напружень, при відповідному їх виборі, можна запобігти відмови рейок по дефектам втоми або необхідним чином обмежити інтенсивність їх появи, а також знизити інтенсивність накопичення залишкових деформацій колії.

Значення допустимих та рекомендованих значень напружень наведені у двох нормативних документах [102, 338]. Згідно [102] значення наведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1

## Допустимі напруження в кромках підшви рейок, МПа

	Рейки безстикової колії				Рейки ланкової колії	
	Термозміцнені (з)		Нетермозміцнені (н/з)		Термо- зміцнені (з)	Нетер- мозмі- цнені (н/з)
	в головці рейки	в підшві рейки	в головці рейки	в підшві рейки		
Для нових рейок						
Для вагонів	350	280	260	205	280	205
Для локомотивів	395	320	290	235	320	235
Для старопритатних рейок						
Для вагонів	285	225	210	165	225	165
Для локомотивів	325	265	240	195	265	195

За допустимі напруження стискання під підкладкою в дерев'яних шпалах  $[\sigma_{ш}]$  приймаються граничні напруження, встановлені за розрахунками на зминання деревини під підкладками [102]. Величина цих напружень встановлена різною для локомотивів і вагонів (з врахуванням меншої повторюваності колісних впливів від локомотивів) і залежить від конструкції верхньої будови колії. Допустимі (з точки зору роботи бетону) напруження стиску під підкладкою в залізобетонних шпалах приймаються  $[\sigma_{ш}^{з.б.}] = 4,0$  МПа за умови забезпечення міцності і тріщиностійкості (шпали розраховуються на симетричний вертикальний тиск  $P = 147$  кН на кожен підрейкову підкладку). Рекомендовані напруження в шпалах  $[\sigma_{ш}]$ , МПа, приймаються за табл. 1.2.

Допустимі напруження стискання в баласті встановлені з необхідності обмеження інтенсивності накопичення залишкових деформацій в баластовому шарі, що розвиваються під рухомим навантаженням. Обмеження повинне звести до мінімуму роботи по виправленню положення рейкових ниток, які викривляються при накопиченні залишкових деформацій баластового шару.

Таблиця 1.2

## Рекомендовані напруження в шпалах

Тип рухомого складу та вид шпал		Рекомендовані допустимі напруження в шпалах, МПа, при вантажонапруженості, млн. т. км бруто/км на рік				
		>80	40-80	40-25	25-10	<10
Локомотиви	дерев.	0,8	1,2	1,6	2,0	3,0
	з.б.	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Вагони	дерев.	0,7	1,1	1,5	1,8	2,7
	з.б.	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Граничні напруження стиску в баласті  $[\sigma_{\sigma}]$ , рекомендовані для умов нормальної експлуатації колії, так як і напруження в шпалах приймаються різними для локомотивів і вагонів (з врахуванням меншої повторюваності колісних впливів локомотивів) і, крім того, залежать від роду баласту. Ці напруження в МПа приймаються за табл. 1.3.

Таблиця 1.3

## Рекомендовані напруження в баласті

Тип рухомого складу та вид баласту		Рекомендовані допустимі напруження в баласті, МПа, при вантажонапруженості, млн. т. км бруто/км на рік				
		>80	40-80	40-25	25-10	<10
Локомотиви	щебінь	0,38	0,4	0,42	0,45	0,5
	пісок	0,24	0,25	0,26	0,28	0,31
	гравій	0,26	0,28	0,3	0,32	0,36
Вагони	щебінь	0,24	0,26	0,3	0,35	0,4
	пісок	0,15	0,16	0,19	0,22	0,25
	гравій	0,17	0,19	0,21	0,25	0,29

Рекомендовані допустимі значення напруження стиску ґрунту на основній площадці земляного полотна приймаються за табл. 1.4.

Таблиця 1.4

## Допустимі напруження на основній площадці земляного полотна

Тип рухомого складу	Значення допустимих напружень на основній площадці земляного полотна в МПа, при вантажонапруженості в млн. т. км бруто/км на рік				
	>80	40-80	40-25	25-10	<10
Локомотиви	0,1	0,1	0,1	0,11	0,12

Вагони	0,08	0,08	0,08	0,09	0,1
--------	------	------	------	------	-----

Згідно за [338] значення допустимих і рекомендованих величин, що перевіряються наведені в табл. 1.5. Не дивлячись на те, що напруження у всіх елементах колії, які розраховуються за існуючою методикою, мають пряму залежність від модуля пружності підрейкової основи, у вище наведених документах його значення не мають обмежень не в перетині колії ні по її довжині. Таким чином, відсутня можливість поєднання стану елементів конструкції колії зі станами самої конструкції колії.

Таблиця 1.5

### Критерії визначення допустимих швидкостей руху рухомого складу

Критерій	Допустиме значення	
1	2	
Напруження в кромках підшви рейки в колії, в передньому вильоті і перевідних кривих стрілочних переводів	240 МПа	
Напруження: – у зовнішніх кромках підшов гостряків та осердя хрестовини з рухомими елементами; – у зовнішній кромці підшов рамних рейок, рейок з'єднувальної частини, ходових рейок біля контррейок; - у контррейках стрілочних переводів.	275 МПа  240 МПа 330 МПа	
Напруження в шпалах (для локомотивів)	2,2 МПа – для дерев'яних шпал 4,0 МПа – для залізобетонних шпал	
Напруження в баласті під шпалою	для локомоти-вів	щебінь – 0,38 МПа
		гравій – 0,26 МПа
Напруження в баласті під шпалою	для локомоти-вів	щебінь – 0,38 МПа
		гравій – 0,26 МПа
	для вагонів <sup>1</sup>	щебінь – 0,24 МПа
		гравій – 0,17 МПа
Напруження на основній площадці земляного полотна	для вагонів <sup>1</sup> – 0,08 МПа для локомотивів – 0,1 МПа	
Динамічне погонне навантаження на колію від візка (для локомотивів) не більше, кН/м	168	
Вертикальні переміщення рейок <sup>2</sup> , мм	10	
Горизонтальні переміщення брусів <sup>2</sup> ,мм	2	

Горизонтальні переміщення рейок <sup>2</sup> , мм	6
---	---

## Закінчення табл. 1.5

<p>Рамні сили, кН  <math>Y_p = Y_{\text{бок.мах}} - P_k \cdot \mu</math>  де: <math>Y_{\text{бок.мах}}</math> – максимальне бокове навантаження;  <math>P_k</math> – вертикальне навантаження від колеса;  <math>\mu</math> – коефіцієнт тертя.</p>	<p><math>0,40 \cdot P_{\text{ст}}</math> – для локомотивів на колії зі щебеним баластом;  <math>0,30 \cdot P_{\text{ст}}</math> – для локомотивів і порожніх вантажних вагонів на колії з гравійним або піщаним баластом;  <math>0,38 \cdot P_{\text{ст}}</math> – для порожніх вантажних вагонів на колії зі щебеним баластом;  <math>0,30 \cdot P_{\text{ст}}</math> – для вантажних вагонів;  <math>0,25 \cdot P_{\text{ст}}</math> – для всіх типів рухомого складу на колії з баластом з глинистими включеннями.</p>
<p>Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки <math>\frac{H_{\text{шп}}^{\text{мах}}}{P_{\text{шп}}^{\text{ср}}}</math>,  де <math>H_{\text{шп}}^{\text{мах}}</math> - максимальне горизонтальне навантаження рейки на шпалу; <math>P_{\text{шп}}^{\text{ср}}</math> - середнє вертикальне навантаження рейки на шпалу.</p>	<p>1,4 – на щебеному баласті  1,1 – на гравійному або піщаному баласті</p>
<p>Коефіцієнт запасу стійкості проти сходу колісної пари з рейок</p>	<p>&gt; 1,4 – для локомотивів;  &gt; 1,3 – для вантажних вагонів;  &gt; 1,6 – для пасажирських вагонів;  &gt; 1,4 – для ізотермічних вагонів</p>
<p>Бічне навантаження колеса на рейку з умов міцності рейкових скріплень на перегонах і стрілочних переводах, кН</p>	<p>Для вагонів:  100 – на коліях; 120 – на стрілочних переводах.  Для локомотивів:  120 – на коліях; 150 – на стрілочних переводах.</p>

Примітка: 1 – для вантажних та пасажирських вагонів; 2 – рекомендований показник, який не враховується при визначенні граничних швидкостей.

При забезпеченні зазначених параметрів міцності елементів колії та стійкості рейко-шпальної решітки і нижньої будови колії, працездатний стан конструкції колії перевіряється комплексом заходів з діагностики, що визначають геометричне положення колії у плані та профілі, наявність габаритів, а також проведення неруйнівного контролю стану рейок та стрілочних переводів (його елементів) із застосуванням відповідного обладнання. Але зазначені діагностування призначені для фіксування відхилень

або дефектів та не дозволяють забезпечувати виконання основного завдання з утримання інфраструктури - виконання превентивних робіт з обслуговування та ремонту об'єктів інфраструктури і недопущення змін у їх технічному стані, який не забезпечує необхідний рівень безпеки руху та обсяги перевезень. Оскільки без встановлення зв'язку між умовами функціонування елементів колії та роботою конструкції колії не може бути забезпечено повноту рівня безпеки протягом терміну експлуатації через ризик, що при певних умовах роботи елементів колія не буде задовольняти певним функціям безпеки.

### **1.3.Методика експериментального визначення напружено-деформованого та якісного стану колії**

Надійним способом отримання точних розрахунків при дослідженні взаємодії колії і рухомого складу та перевірки правильності теоретичного опису цих процесів були і залишаються експериментальні методи. Експериментальні дослідження відрізняє надійність отримання кінцевих результатів, однак вони меншою мірою, ніж теоретичні дослідження, дають можливість простежити ланцюг причин і наслідків досліджуваних процесів. Тому раціональне поєднання експериментальних і теоретичних методів дозволяє добре і надійно проникати в сутність явищ взаємодії колії та рухомого складу та керувати ними.

Залежно від потреб теорії і практики в експериментальних дослідженнях взаємодії колії та рухомого складу зазвичай ставлять такі задачі: 1) визначення динамічних і по впливу на колію характеристик будь-якої одиниці рухомого складу, в тому числі найбільших допустимих і оптимальних швидкостей руху в різних умовах експлуатації; 2) оптимізація конструкції екіпажу, спрямована на поліпшення його динамічних якостей, зменшення впливу на залізничну колію і забезпечення міцності самої конструкції; 3) встановлення норм

влаштування, утримання рухомого складу та колії; 4) отримання відомостей про вплив конструктивних особливостей колії та рухомого складу на параметри, що входять в теоретичні розрахунки та необхідні для аналізу і прогнозування багатьох складних динамічних процесів в колії і рухомому складі.

Кожна із зазначених вище задач вирішується прямими вимірами параметрів динамічних процесів, відповідним методом обробки, систематизацією та аналізом результатів вимірювань. Експериментальні дослідження процесів взаємодії колії та рухомого складу, звані комплексними випробуваннями, складаються з двох основних видів випробувань: динамічних (ходових) і з оцінки впливу екіпажу на колію. У ходових випробуваннях при русі екіпажу безперервно або через задані або випадково визначальні інтервали часу на ньому реєструються динамічні процеси; у випробуваннях по впливу екіпажу на колію на фіксованих ділянках (відрезках) колії вимірюються і реєструються динамічні процеси в елементах колії. Їх спільний аналіз, що включає і взаємну кореляцію отриманих даних, дозволяє з достатньою повнотою вирішувати поставлені в експериментах задачі. Всі вимоги щодо проведення експериментальних досліджень наведені у [339].

Для отримання вертикального модуля пружності колії проводили експерименти за допомогою спеціального вагона-лабораторії, обладнаного гідравлічним навантажувальним пристроєм. Такими методиками володіли ВНІЗТ, ДІТ, ЛІЗТ і НІЗТ.

Окрім вагонів-лабораторій існували ще два засоби визначення жорсткості колії. Перший це навантажувальний поїзд ЛІГО, ВНІЗТу, що складався з трьох вагонів з осьовими навантаженнями 10, 14 і 20 т / вісь з системою безконтактної зйомки пружною осідання колії. Другий - пристрій для вимірювання пружних характеристик колії належав Науково-конструкторському технологічному бюро колійного господарства Укрзалізниці (НКТБ ЦП УЗ), вимірювання проводились стаціонарно, принцип дії ідентичний

принципом вимірювання модульним вагоном, особливістю конструкції була можливість зйомки пружних характеристик суміщених колій.

Але перелічені засоби на сьогодні або прийшли в занепад, або показали свою недоцільність, тому, величини модуля пружності підрейкової основи або визначають теоретично, або застосовують рекомендовані у [102] значення.

Типові експериментальні дослідження зводяться до визначення станів рухомого складу та колії в конкретних перетинах, та відповідності цих станів нормативам [339].

Сучасні вивчення взаємодії рухомого складу та колії за допомогою тензометричних пар дуже суттєво розширює можливість оцінки взаємодії колії та рухомого складу. Так в роботах [340... 341] наведено результати оцінки стану колії геометрично-силовим методом. Показано, що частину сходонебезпечних ділянок колії не вибраковують традиційними способами, які базуються на оцінці геометричних параметрів колії. За проведеним аналізом перетини колії з низьким коефіцієнтом стійкості проти сходу з рейок запропоновано розбити на три групи. Результати цих робіт суттєво уточнюють небезпечні співвідношення параметрів колії та рухомого складу та звужують коло досліджень.

#### **1.4.Висновки по розділу 1**

Проблема оцінки та прогнозування надійної та функціонально-безпечної роботи колії є частиною загального розуміння і підходу до управління показниками надійності і безпеки об'єктів залізничного транспорту з позицій оцінки ризиків і вартості життєвого циклу. Відомі методи та критерії оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу, що засновані на оцінці несучої здатності елементів колії та стійкості рейко-шпальної решітки, не

дають можливості описати функціонування конструкції колії з точки зору її надійної та функціонально-безпечної роботи. Проведені в розділі дослідження та аналіз стану проблеми стосовно оцінки роботи колії під впливом рухомого складу за оглядом теоретичних моделей та методів, що застосовуються для вивчення проблеми, нормативних документів, що контролюють проблему, експериментальних методів, що вивчають проблему, показав актуальність теми та необхідність рішення задач з оцінки роботи залізничної колії для забезпечення її довговічності та рівня повноти безпеки взаємодії колії та рухомого складу.

Рішення даної проблеми на належному теоретичному, експериментальному та методичному рівні пов'язано з розвитком наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу шляхом розробки нових методів визначення раціонального, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії. Вище наведене є загальною задачею дисертаційної роботи.

Аналіз розвитку існуючих досліджень показав, що основними прийомами, якими користуються при рішенні задач за сучасними методиками, є детерміністична постановка проблеми та застосування апроксимуючих функцій. При наявності численних результатів досліджень роботи елементів конструкції залізничної колії окремо, конструкції залізничної колії в цілому, впливу рухомого складу на колію та роботи системи «екіпаж – колія» до сих пір відсутня фізично обґрунтована загально признана методика з визначення механізмів передачі навантажень від рухомого складу на колію в часі. Існує проблема, пов'язана з відсутністю методу визначення параметричних даних розповсюдження взаємодії колії та рухомого складу.

Аналіз нормативної бази стосовно оцінки роботи залізничної колії показав, що основними параметрами оцінки є параметри міцності елементів колії та стійкості рейко-шпальної решітки й нижньої будови колії, при дотриманні яких діагностуються геометричне положення колії у плані та

профілі, наявність габаритів, а також проведення неруйнівного контролю стану рейок та стрілочних переводів (його елементів) із застосуванням відповідного обладнання. Але зазначені параметри та діагностування призначені для фіксування відхилень або дефектів та не дозволяють прогнозувати виконання превентивних робіт з обслуговування та ремонту об'єктів інфраструктури і недопущення змін у їх технічному стані, який не забезпечує необхідний рівень безпеки руху та обсяги перевезень. Оскільки без встановлення зв'язку між умовами функціонування елементів колії та роботою конструкції колії не може бути забезпечено повноту рівня безпеки протягом терміну експлуатації через ризик, що при певних умовах роботи елементів колія не буде задовольняти певним функціям безпеки.

Аналіз проблеми, що розглядається в роботі, дозволяє визначити основні комплексні підходи та напрямлення її рішення, на основі яких етапи структурно-логічної схеми проведення подальших досліджень такі:

1 етап - дослідження дефініцій категорійно-понятійного апарату досліджуваної проблеми.

2 етап - удосконалення методу визначення параметрів напружено-деформованого стану елементів залізничної колії для дослідження їх деформативної роботи.

3 етап - визначення основних складових щодо оцінки та прогнозування життєвого циклу функціонування залізничної колії та розробка методу теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу.

4 етап - розробка математичної моделі для визначення параметрів напружено-деформованого стану колії застосованої запропонованим методом.

5 - експериментальна оцінка достовірності розробленої моделі.

6 - дослідження впливу колісної пари на деформативну роботу залізничної колії магістрального та промислового транспорту.

7 етап - дослідження процесу деформативності колії магістрального та промислового транспорту.

8 етап - формування оціночних умов процесу деформативної роботи колії магістрального та промислового транспорту.

## **РОЗДІЛ 2**

### **РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ОЦІНКИ РОБОТИ КОЛІЇ ПІД ВПЛИВОМ РУХОМОГО СКЛАДУ**

#### **2.1. Передумови та основні поняття щодо дослідження деформативної роботи магістральної та промислової колій**

Несуча здатність сучасних конструкцій верхньої будови колії перевищує рівень впливу рухомого складу на неї, і у зв'язку з цим, змінився підхід до оцінки роботи колії під впливом рухомого складу від оцінки параметрів міцності елементів конструкції колії та стійкості рейко-шпальної решітки до оцінки надійної та функціонально-безпечної роботи конструкції колії. Вивчення умов надійної роботи конструкції колії передбачає вивчення умов безвідмовної роботи конструкції колії і настання її критичних станів, при яких доцільно проводити ремонти та технічне обслуговування для забезпечення ефективного використання конструкції протягом терміну експлуатації. На основі проведеного в першому розділі аналізу основних напрямків досліджень параметрів взаємодії залізничної колії і рухомого складу та їх нормативної оцінки, автор сформував три тези - ідеї концептуального рівня, доведення яких вирішить проблему, що сформульовано в дисертації.

1. Відомі методи та критерії оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу, що засновані на оцінці несучої здатності елементів колії та стійкості рейко-шпальної решітки, не дають можливості описати функціонування конструкції колії з точки зору її надійної та функціонально-безпечної роботи, у зв'язку з чим подальший розвиток методів оцінки роботи залізничної колії є актуальним та має суттєве значення для підвищення

ефективності використання конструкції колії та її елементів шляхом врахування довговічності та рівня повноти безпеки взаємодії колії та рухомого складу.

2. Описання фізичної природи динамічного розповсюдження впливу рухомого складу на конструкцію колії здійснено на основі описання механізму впливу рухомого складу на колію імпульсами, які збуджують площадки контакту рейок з колесами, що розташовані за траєкторією руху колісної пари, з урахуванням часу появи та дії навантажень в них, кожен з яких залежить від швидкості руху поїздів, та надалі поширюється силовими хвилями.

3. Досягти ефективного використання конструкції колії та її елементів, шляхом встановлення раціонального співвідношення фактичних умов експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії, можливо на основі дослідження деформативної роботи колії, оціненої за її інтенсивністю, моделлю просторових коливань елементів конструкції залізничної колії.

Отже, надалі автор реалізуватиме зазначені тези.

Відомо, що важливіші елементи конструкції колії, що визначають безпеку руху поїздів, такі як рейки та стикові накладки, баластна призма та земляне полотно, отримують пошкодження в більшості випадків не тому, що при якомусь збігу обставин (механічних, атмосферних, біологічних) відбувся динамічний силовий вплив рухомого складу на них, бо перевищив межі міцності, навіть з врахуванням статистичної дії цих впливів, а як наслідок багаторазового прикладення до них різноманітних по величині навантажень, що обумовили розвиток пошкоджень або дефектів, тобто внаслідок розвитку процесу втоми як самих матеріалів елементів конструкції колії, так і втоми конструкції загалом.

Так як питання про інтенсивність накопичення залишкових деформацій в колії безпосередньо пов'язано з економічними параметрами її експлуатації, то розрахунки та дослідження залізничної колії разом із параметрами міцності і тими що вирішують питання безпеки, повинні давати можливість визначати інтенсивність накопичення залишкових деформацій в залежності від конструкції колії, системи її утримання та впливу рухомого складу і його

режиму обертання по колії. Отже необхідно проводити аналіз параметрів, що характеризують деформативні процеси в конструкції колії.

Таким чином, для дослідження розвитку процесів, що відбуваються в конструкції колії під впливом рухомого складу, запропоновано ввести поняття та критерії оцінки деформативної роботи елементів та конструкції колії, які розкривають суть досліджень.

Введення нового критерію повинно бути ретельно обґрунтовано, тому що його наявність викликає додаткову відповідальність. Крім того, новий критерій повинен доповнювати існуючі не дублюючи їх. Тому нижче наведені передумови які обґрунтовують необхідність введення нового параметру.

1. Якщо розглядати конструкцію залізничної колії як цілісну систему, що складається з окремих елементів (рейок, скріплень, шпал, баластного шару та земляного полотна), які схильні до зносу, то на даному етапі відсутня єдина методика оцінки працездатності такої системи. Оскільки, без встановлення зв'язку між умовами функціонування елементів колії та роботою конструкції колії, не може бути забезпечено повноту рівня безпеки протягом терміну експлуатації через ризик, що при певних умовах роботи елементів колія не буде задовольняти певним функціям безпеки.

2. Дотепер відсутня нормативна документація щодо оптимальної жорсткості колії з точки зору подовження строку її експлуатації.

3. Розгляд роботи конструкції колії з точки зору положень надійності, передбачає вивчення не тільки змін її стану під впливом динамічної дії рухомого складу, а й урахування зміни пружних властивостей матеріалів елементів конструкції, що відбуваються протягом терміну експлуатації за рахунок сезонних змін та процесів зношування. Отже, існує проблема відсутності методик визначення та оцінки надійної роботи колії.

4. Щоб ефективно використовувати скріплення, необхідно встановити для кожного його типу оптимальний режим роботи, тобто інтервал значень жорсткості підшпальної основи. А розробка вимог до жорсткості скріплення в

залежності від жорсткості підшпальної основи дає можливість якісно розроблять їх конструкцію.

5. Дотепер не розроблено нормативну методикку посилення та стабілізації земляного полотна за рахунок укладання стабілізуючих шарів в залежності від категорії колії. Введення нового критерію дасть можливість розрахунку конструкції стабілізуючого шару для підсилення та стабілізації земляного полотна.

6. Застосування стабілізуючих шарів та ефективне використання скріплень згідно з параметрами деформативності колії може зменшити долю прогинів земляного полотна в загальному прогині конструкції до 5%, як в конструкціях, що використовуються в Західній Європі. Що по-перше, подовжить строк служби всіх елементів конструкції залізничної колії, а по-друге, допоможе забезпечувати оптимальну жорсткість безстикової колії за рахунок використання удосконалених або розроблених пружних елементів конструкції.

7. Зміна геометричних параметрів рейкової колії (ширина колії, положення по рівню та в плані, просадки рейкових нитей) і конструкції колії в цілому (величини плеча баластної призми та обочини земляного полотна, їх відкоси) пов'язані зі зміною стану кожного елемента конструкції залізничної колії (гнилість шпал, забруднення баласту, стан скріплень та земляного полотна). Тому неможна розглядати зміну одних параметрів без врахування інших. Так, критерієм призначення комплексно-оздоровчого ремонту є кількість відступів й кількість непригодних шпал і скріплень. Але на одну ж ту саму ступінь відступів приходить різна кількість несправностей: відступів за рівнем та в плані, просадок, перекосів, або їх поєднання. Тому без даних про стан елементів колії планування робіт по встановленню рівнопружності залізничної колії не може бути оптимальним. Що також доводить необхідність нормування деформативності колії та встановлення взаємозв'язків з існуючими критеріями.

8. Введення критерію деформативності колії поєднає розрахунки верхньої та нижньої будов колії при встановленні конструкції за певними умовами експлуатації та навпаки.

9. Введення критерію деформативності колії дозволить розробити метод щодо призначення терміну і обсягу робіт ремонтів як верхньої так і нижньої будови колії в залежності від категорії колії умов експлуатації та природно-кліматичних умов.

Термін «деформативність» характеризує здатність матеріалу до зміни форми і розмірів без відхилення від величини його маси. Отже, деформативність елементів це здатність твердих тіл піддаватися різним видам деформації.

Деформативність залізничної колії є властивістю конструкції, що характеризується сукупністю деформативностей елементів конструкції колії.

Для дослідження розвитку процесів, що відбуваються в конструкції колії під впливом рухомого складу, запропоновано ввести поняття та критерії оцінки роботи елементів та конструкції колії, які розкривають суть досліджень. До введених понять відносяться:

- статична деформативність колії - виникнення пружних деформацій у навантаженій конструкції колії, викликаних як пружними змінами форми або розмірів елементів конструкції колії чи їхніх частин, так і обумовлені цими змінами переміщення окремих точок конструкції колії;

- динамічна деформативність – виникнення під впливом навантаження конструкції колії деформацій, викликаних змінами форми, розмірів або об'єму елементів, вібрацією елементів конструкції колії чи їхніх частин, змін властивостей матеріалів елементів та обумовлені всіма перемінами переміщення окремих точок конструкції колії;

- деформативна робота колії - процес динамічної деформативності, що відбуваються під впливом рухомого складу;

- життєвий цикл деформативної роботи колії - сукупність взаємопов'язаних, послідовно здійснюваних процесів деформативності роботи колії від початкового укладання до виведення з експлуатації та утилізації.

До введених критеріїв оцінки роботи елементів та конструкції колії відносяться:

- а) робота елементу - робота сили, що діє на елемент конструкції колії;
- б) робота колії, як сума робіт, що виконують всі елементи конструкції колії в одному перетині від впливу рухомого складу з урахуванням часу сприймання та реакції елементів на вплив.

## **2.2.Обґрунтування можливості застосування величин роботи діючих на колію сил як параметр її зношування**

Основним критерієм призначення ремонтів колії є пропущений тоннаж [335]. Дійсно, основна робота, яку виконує колія, і від якої відбувається її поступове зношування є сприйняття навантаження від рухомого складу. Звичайно на процес вичерпання ресурсу колії буде впливати не тільки загальний обсяг сприйнятого навантаження, а і його структура, а також стан колії і система ремонтів по відновленню її працездатного стану. Тому необхідно мати критерій, що враховує перелічені чинники і надає змогу визначити ступень зношування колії, і як наслідок величину витрат на її ремонт та термін роботи.

Для перерізу колії пропущений тоннаж можна представити як суму ваги, що передається на нього від кожного колеса, що проїхало. При використанні існуючих методик доцільно розглядати квазідинамічне навантаження з урахуванням ступеня вірогідності. Механічна робота, яку буде виконувати діюча на переріз колії сила можна визначити як добуток цієї сили на

переміщення, яке вона спричиняє. Для колії таким переміщення буде вертикальний прогин.

Дію від колеса на переріз рейки і відповідний прогин можна визначити за практичними розрахунками колії на міцність [102].

Таким чином пропонується кількісний критерій дії на колію – механічна робота вертикальної сили на переріз колії. Такий показник можна вважати більш розкритою формою пропущеного тоннажу і використовувати для оцінки поступового зношування колії і строків призначення ремонтів, але з урахуванням характеристик рухомого складу і стану колії.

Робота вертикальної сили від одиниці рухомого складу (одного вагона або локомотива) для перерізу колії буде визначатися за наступною формулою:

$$R = 2n_{\text{в}} \cdot P_{\text{екв}}'' \cdot \alpha \cdot z_{\text{max}} \quad (2.1)$$

де  $P_{\text{екв}}''$  – вертикальна сила, діюча від візка на рейку, від значення якої обчислюється вертикальний прогин рейко-шпальної решітки;

$z_{\text{max}}$  – максимальний прогин рейко-шпальної решітки в точці прикладення сили;

$\alpha$  – коефіцієнт вигину шпали, для переходу від максимального значення прогину до середнього [102];

$n_{\text{к}}$  – кількість коліс.

Значення вертикальної сили ( $P_{\text{екв}}''$ ) і прогину ( $z_{\text{max}}$ ) обчислюються за методикою інженерного розрахунку на міцність [102].

Відповідно до запропонованої методики було розраховано роботу вертикальних сил при проходженні по колії різних одиниць рухомого складу в залежності від швидкості руху. Результати розрахунку для ділянки, що має стандартну конструкцію верхньої будови колії (рейки Р65, шпали залізобетонні, баласт щебеновий, безстикова колія) і знаходиться у справному стані (відхилення від норм утримання у межах I...II ступеня, модуль пружності

підрейкової основи 50 МПа) показані у вигляді графіків залежності вертикальної сили від швидкості руху, рис. 2.1 – 2.2

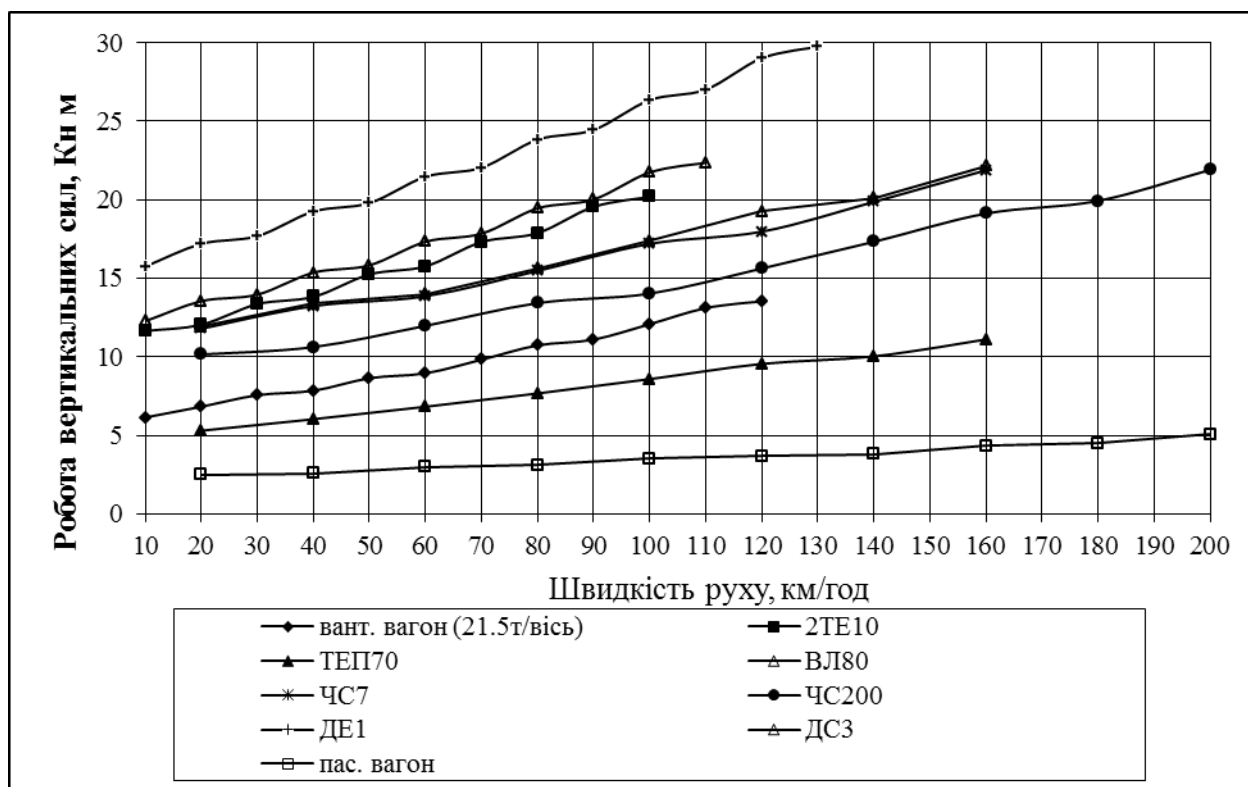


Рисунок 2.1 - Залежність роботи вертикальних сил від швидкості руху одиниці рухомого складу

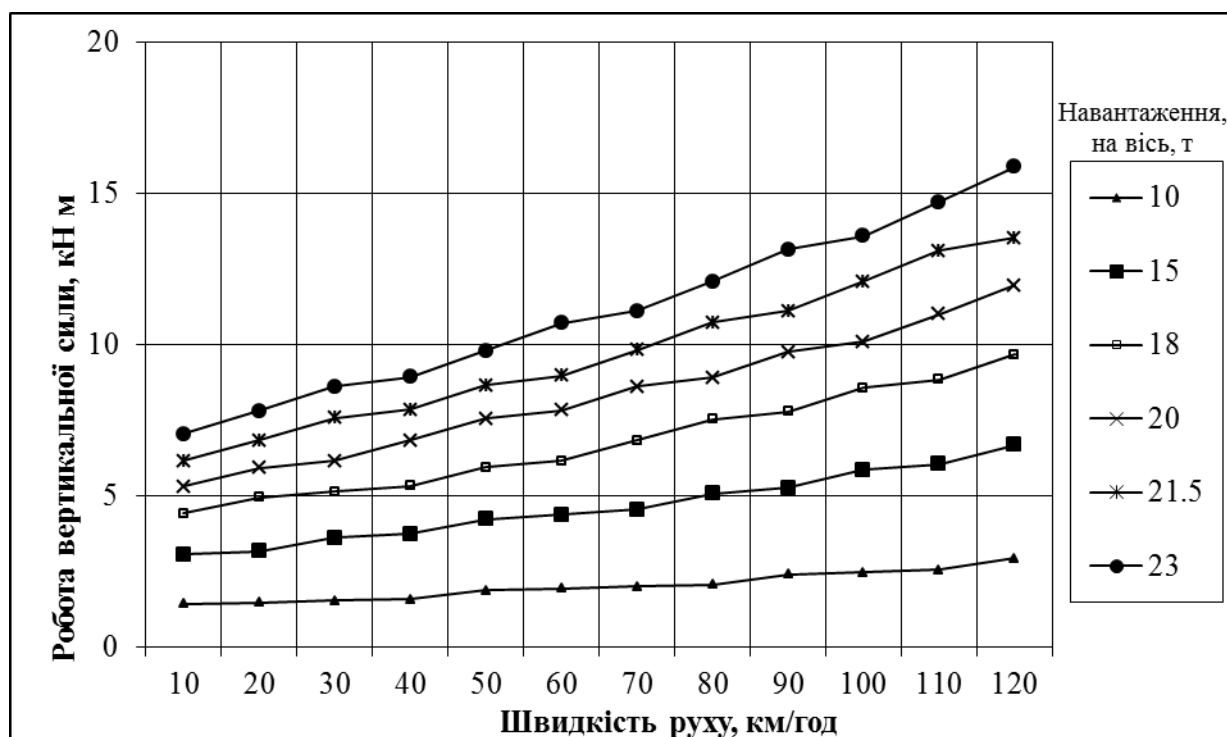


Рисунок 2.2 - Залежність роботи вертикальних сил від швидкості руху для одиночного вантажного вагона

На значення вертикальної сили, яка виконує роботу по прогину рейкошпальної решітки, суттєво впливає стан залізничної колії. На рис. 2.3 та 2.4 показано залежності вертикальної роботи від швидкості руху у відповідності до наступних станів колії:

1 – наявність відхилень I...II ступеня, модуль пружності підрейкової основи 50 МПа.

2 – відхилення III ступеня, модуль пружності підрейкової основи 30 МПа.

3 – відхилення IV ступеня, модуль пружності підрейкової основи 15 МПа.

Залежності вертикальної роботи від швидкості руху у відповідності до стану колії наведені на рис. 2.3 для пасажирського вагона і на рис. 2.4 для вантажного вагона з навантаженням 21,5 т/вісь.

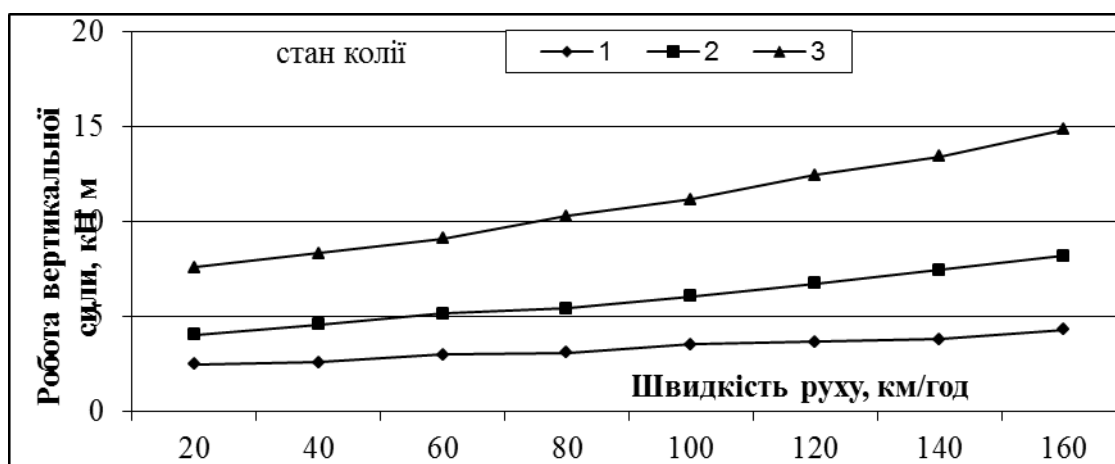


Рисунок 2.3 - Залежність вертикальної роботи від швидкості руху для пасажирського вагона з урахуванням стану колії

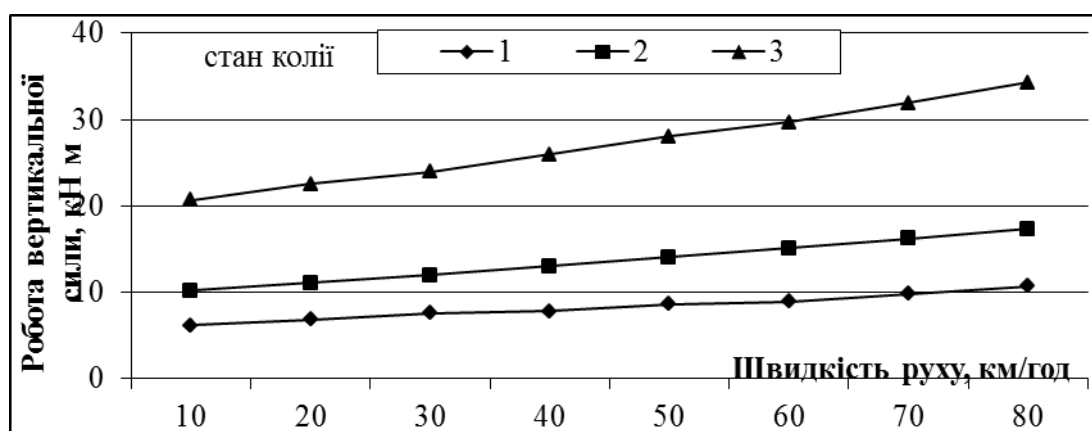


Рисунок 2.4 - Залежність вертикальної роботи від швидкості руху для вантажного вагона (21,5 т/вісь) з урахуванням стану колії

Аналіз отриманих результатів розрахунків виконаних для різних одиниць рухомого складу, показав, що характер зростання роботи вертикальної сили відносно стану колії 1 майже не залежить від типу рухомого складу. На рисунках 2.5, 2.6 наведено зміни обсягу роботи вертикальної сили для 2 та 3 станів відносно стану 1 для пасажирського та вантажного вагонів.

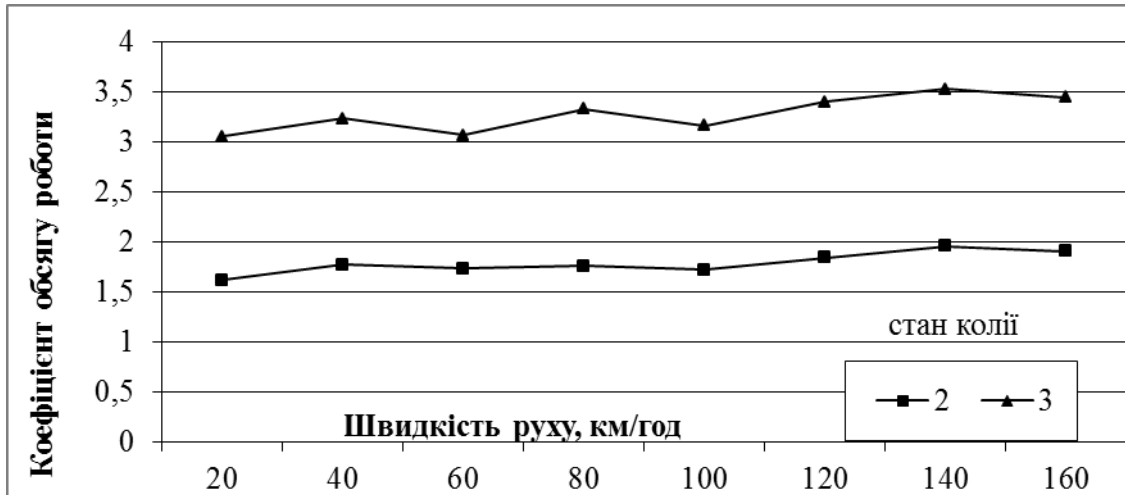


Рисунок 2.5 - Зміна обсягу роботи вертикальної сили при погіршенні стану колії для пасажирського вагону

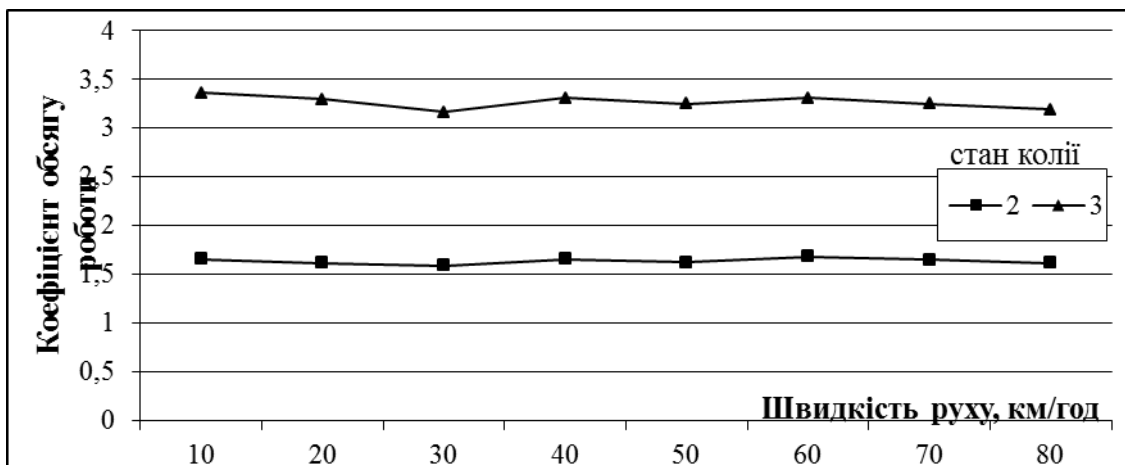


Рисунок 2.6 - Зміна обсягу роботи вертикальної сили при погіршенні стану колії для вантажного вагону (21,5 т/вісь)

На основі виконаних розрахунків і проведеного аналізу були встановлені коефіцієнти, за допомогою яких можна оцінити стан залізничної колії при визначенні роботи вертикальної сили. Так для переходу колії в другий стан необхідно щоб обсяг роботи вертикальних сил збільшився в 1,7 разів; а щоб колія перейшла у третій стан – в 3,2 рази.

Для виконання розрахунку з урахування поїздопотоку у якості вихідних даних була прийнята ділянка Придніпровської залізниці Дніпропетровськ – П'ятихатки. Конструкція верхньої будови колії: рейки Р65, шпали залізобетонні, баласт щебенекий. Рухомий склад: пасажирські вагони на візках КВЗ-ЦНИИ, вантажні на візках ЦНИИ-ХЗ-0, локативи ЧС7 і ВЛ8.

Для аналізу впливу стану колії на роботу вертикальної сили, у проведених розрахунках варіювався модуль пружності підрейкової основи від 10 до 70 МПа і наявність просадок від I до IV ступеня відхилення. Модуль пружності підрейкової основи безпосередньо входить до багатьох формул розрахунку колії на міцність. За ступенем просадок визначалися параметри вертикальної нерівності колії, значення яких впливають на розрахунок відповідного середньоквадратичного відхилення однієї зі складових сили, що діє від колеса на рейку за методикою, запропонованою в [102].

Аналіз отриманих напружень в елементах верхньої будови колії показує, що вони не перевищують допустимі значення для всіх розглянутих станів колії і швидкостей руху. Як і передбачалося відхилення у значеннях модуля пружності підрейкової основи та наявність просадок у дозволених межах [102, 336] не приводять до порушення умов міцності колії. Але тривале збільшення дії на колію (як показано раніше у числовому вигляді буде оцінюватися роботою вертикальної сили) прискорює зношування всіх елементів колії і наближати строк проведення ремонтів.

Для обраної ділянки були проведені розрахунки за формулою (2.1). Отримана залежність обсягу роботи від модуля пружності підрейкової основи і ступеня просадок. Далі прийняли, що експлуатація ділянки в режимі, для якого визначені строки проведення ремонтів [335], буде відповідати розрахунковому варіанту з модулем пружності 50 МПа і наявністю просадок до I ступеня відхилень (1 стан колії). Тоді можна порівняти дії на колію у вигляді вертикальної роботи від різних одиниць рухомого складу. Відповідні графіки приведені на рисунках 2.7....2.14.

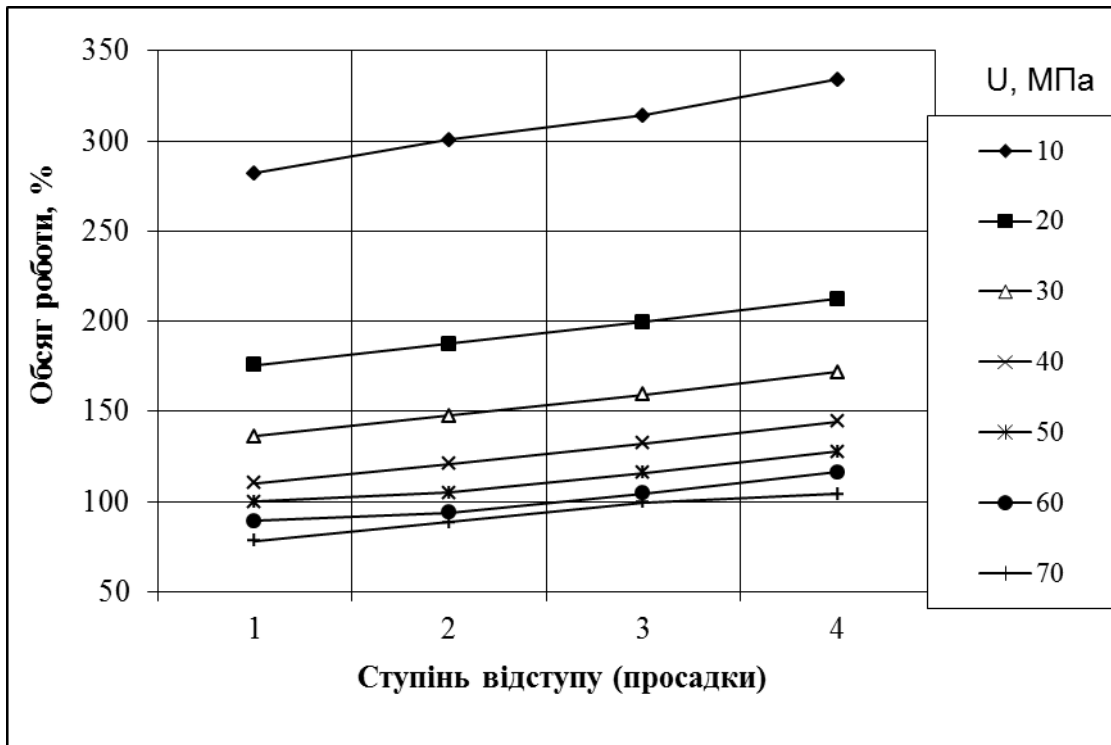


Рисунок 2.7 - Зміна обсягу роботи вертикальної сили від ступеня просадок для різних модулів пружності підрейкової основи (локомотив ВЛ8)

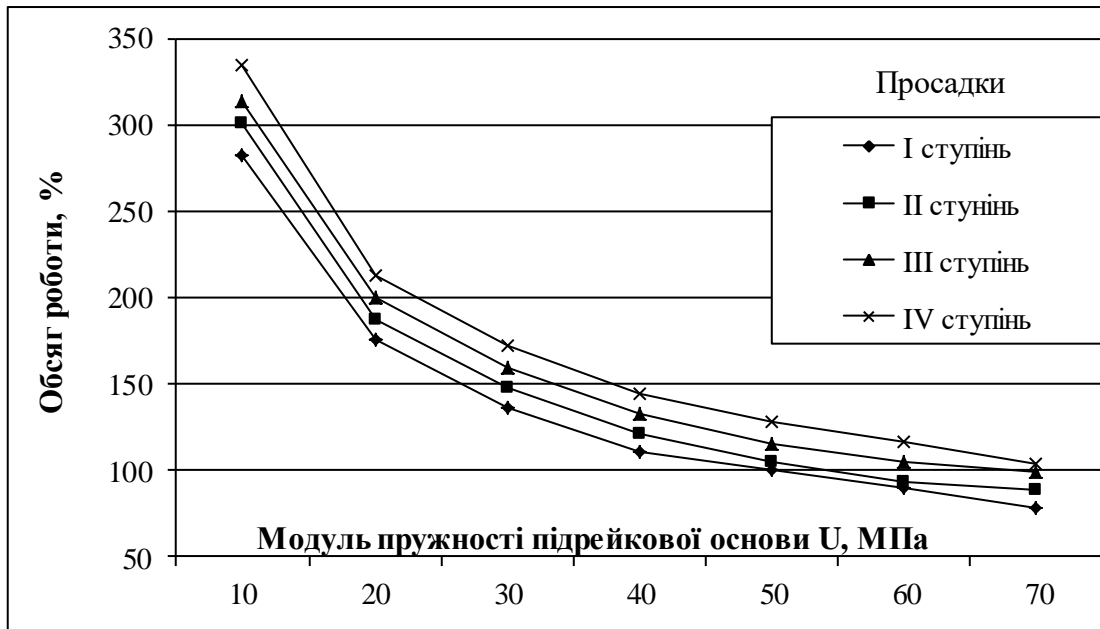


Рисунок 2.8 – Зміна обсягу роботи вертикальної сили від модуля пружності підрейкової основи для різних ступенів просадок (локомотив ВЛ8)

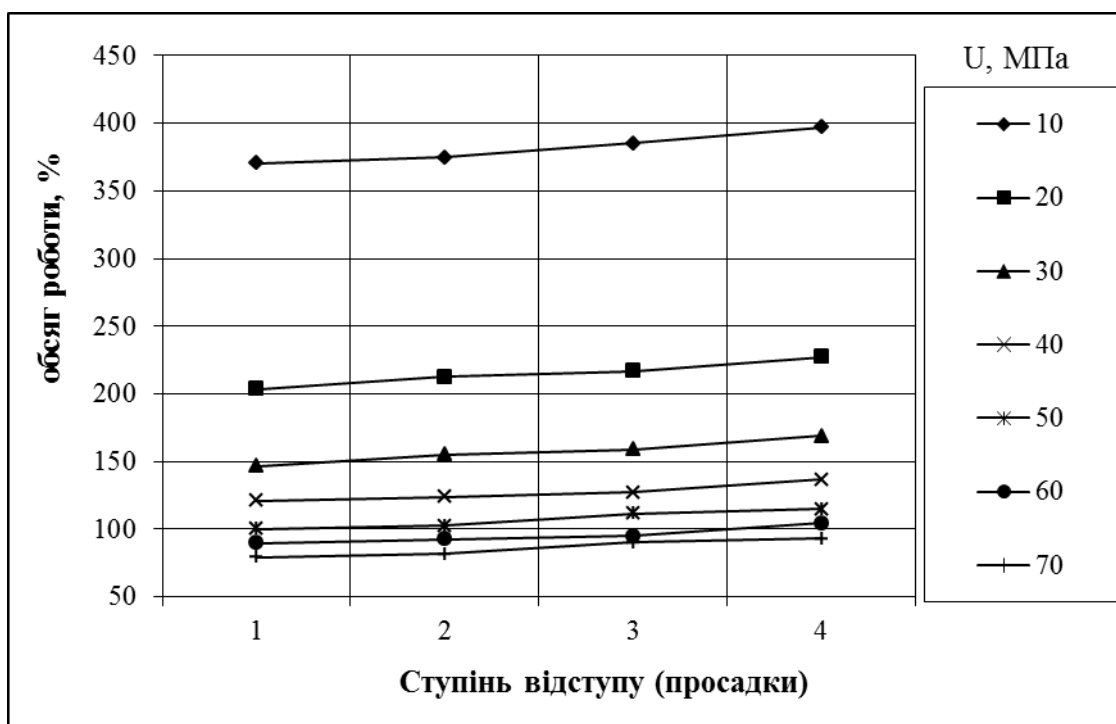


Рисунок 2.9 – Зміна обсягу роботи вертикальної сили від ступеня просадок для різних модулів пружності підрейкової основи (вантажний вагон)

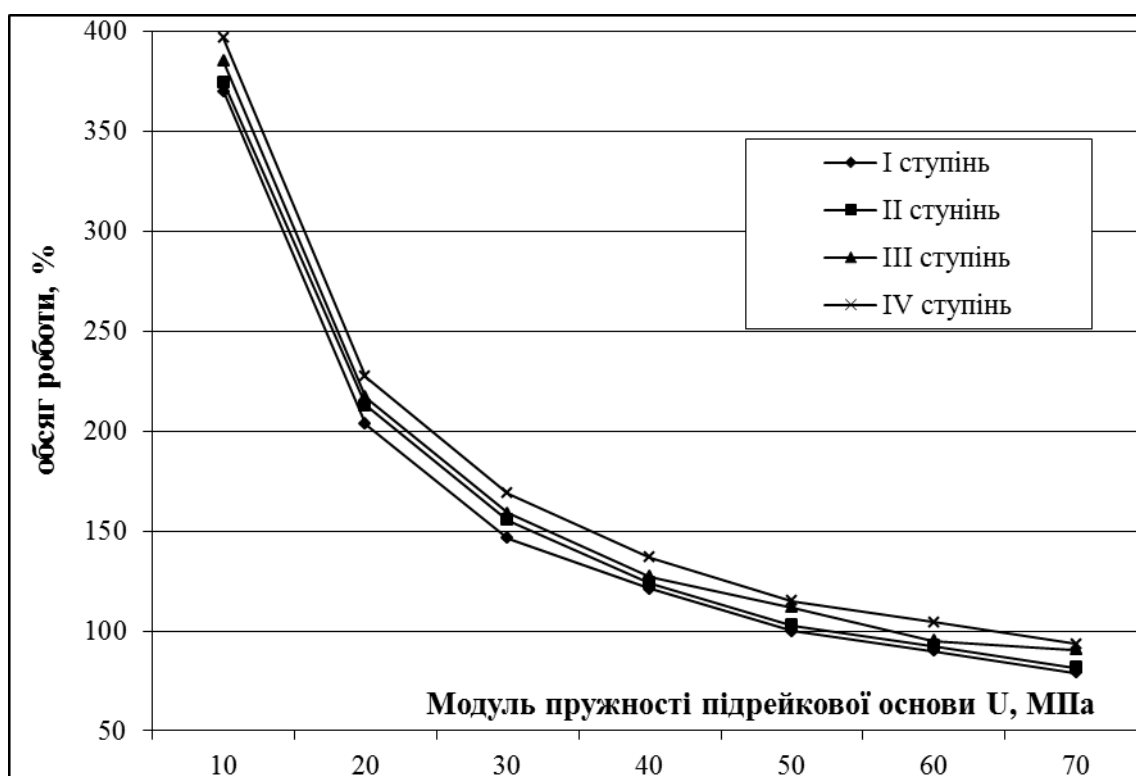


Рисунок 2.10 – Зміна обсягу роботи вертикальної сили від модуля пружності підрейкової основи для різних ступенів просадок (вантажний вагон)

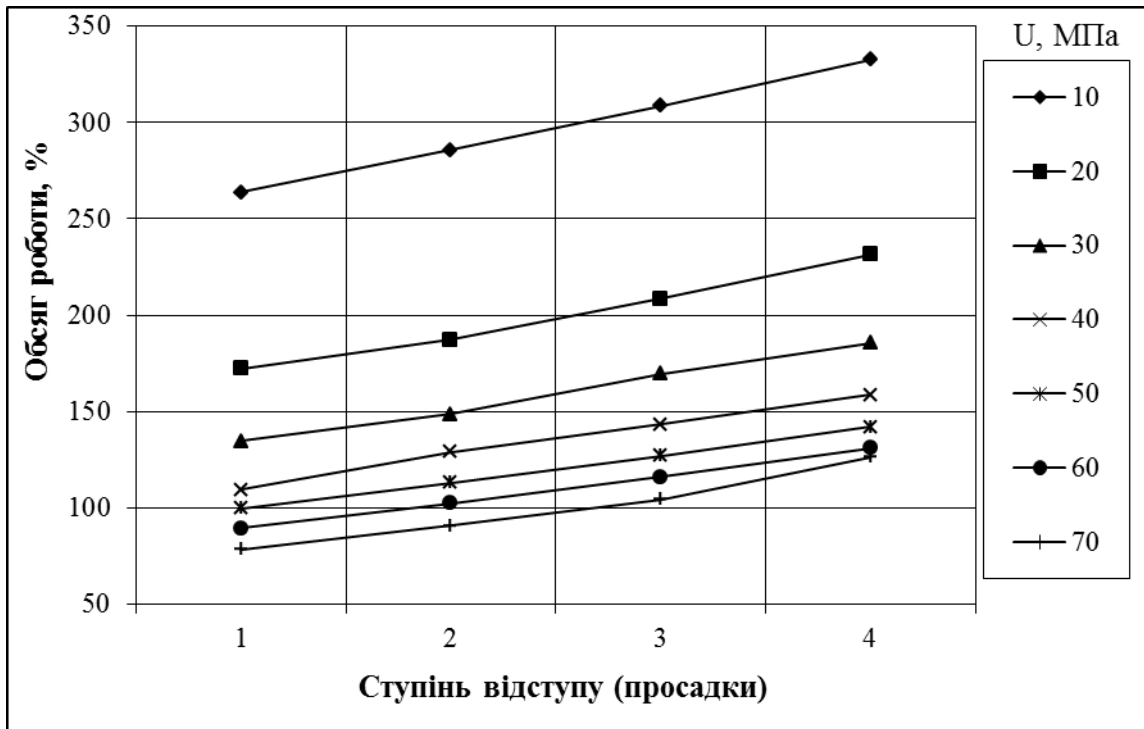


Рисунок 2.11 – Зміна обсягу роботи вертикальної сили від ступеня просадок для різних модулів пружності підрейкової основи (локомотив ЧС7)

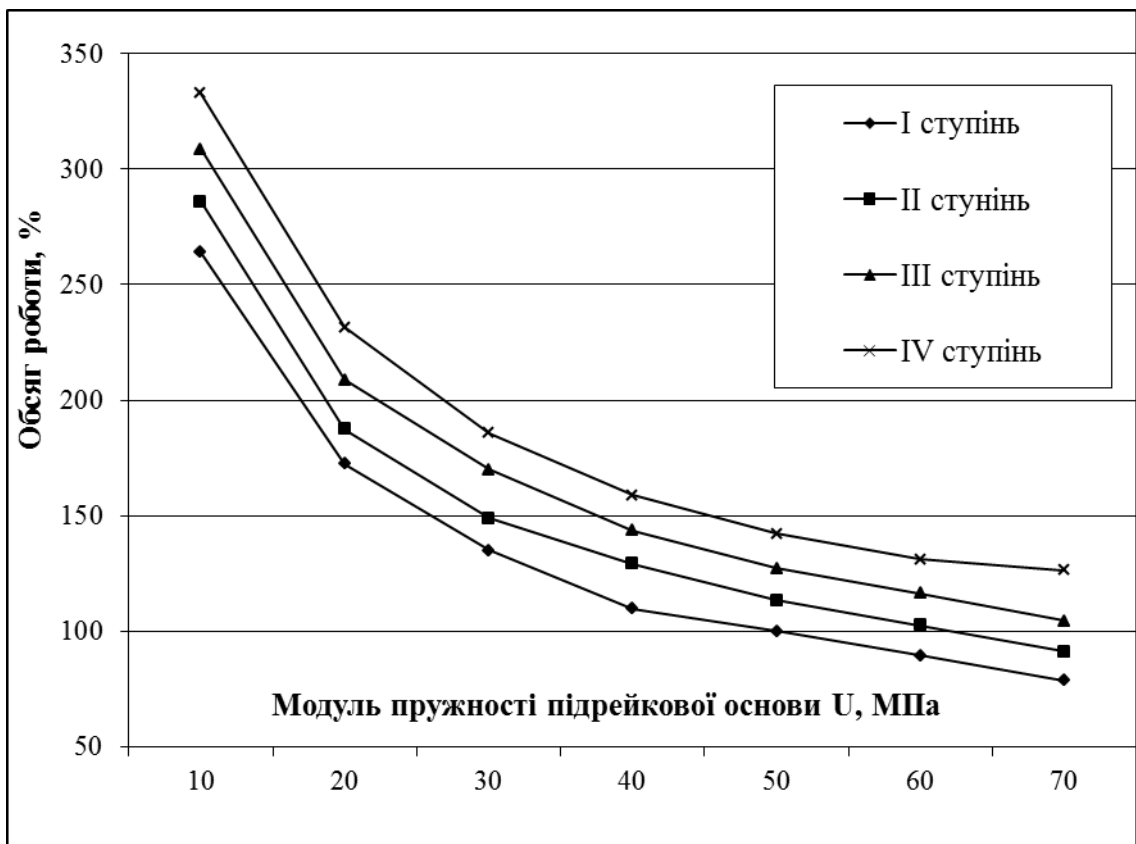


Рисунок 2.12 - Зміна обсягу роботи вертикальної сили від модуля пружності підрейкової основи для різних ступенів просадок (локомотив ЧС7)

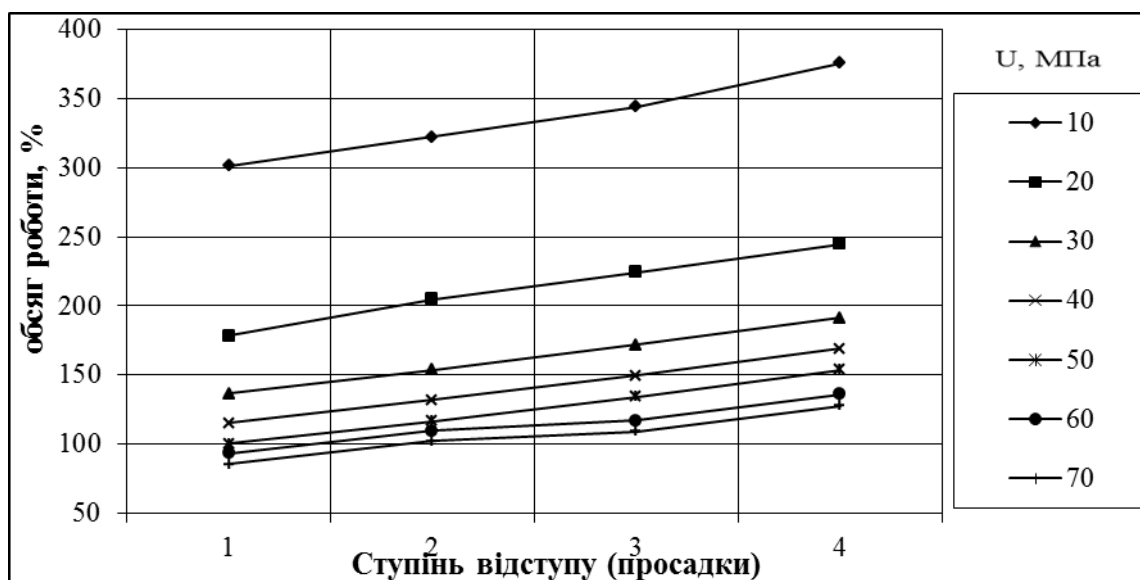


Рисунок 2.13 - Зміна обсягу роботи вертикальної сили від ступеня просядок для різних модулів пружності підрейкової основи (пасажирський вагон)

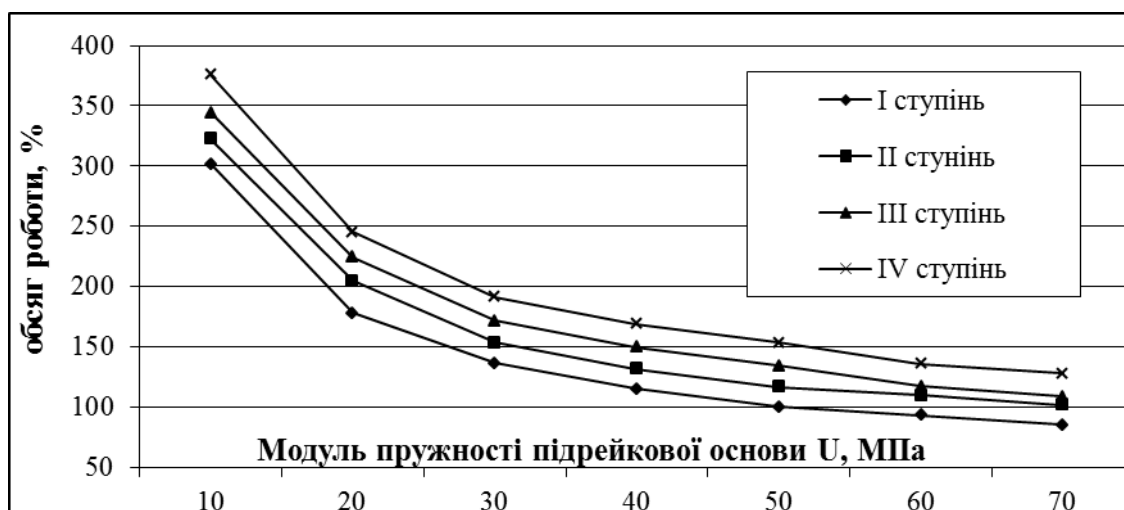


Рисунок 2.14 - Зміна обсягу роботи вертикальної сили від модуля пружності підрейкової основи для різних ступенів просядок (пасажирський вагон)

З наведених графіків, для різних одиниць рухомого складу маємо дещо різні залежності роботи вертикальної сили від модуля пружності підрейкової основи і наявності просядок. Більш об'єктивну оцінку можна отримати, якщо розглянути потік поїздів, який проходить через розрахунковий переріз колії. Згідно даних стосовно ділянки Дніпропетровськ – П'ятихатки, в середньому вантажний поїзд складається з 2 локомотивів і 36 вагонів, а пасажирський поїзд

– з 1 локомотива і 18 вагонів, кількість вантажних поїздів за добу – 45, пасажирських – 35. Були отримані результати розрахунків роботи вертикальної сили від такого потоку. Далі прийнято, що строк між ремонтами при роботі вертикальної сили над колією, яка знаходиться у 1 стані – модуль пружності 50 МПа і наявність просядок до I ступеня відхилень – становить 100%, і оцінено вплив зміни модуля пружності підрейкової основи і ступеня просядок у процентному відношенні обсяг роботи вертикальній сил. Результати такого порівняння приведено на рис. 2.15.

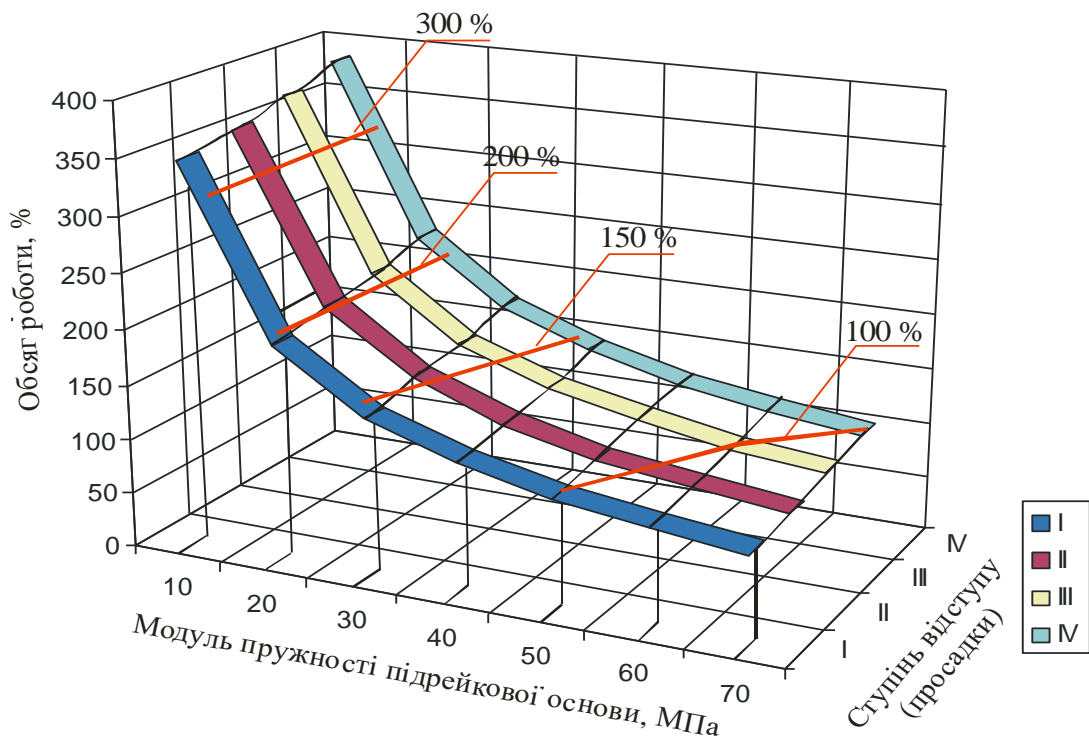


Рисунок 2.15 - Залежність обсягу роботи вертикальних сил від значень модуля пружності підрейкової основи і наявності просядок

Аналіз результатів розрахунків (див. рисунок 2.15) приводить до наступних висновків:

- дія роботи вертикальних сил на колію лінійно залежить від ступеня просядок, збільшення величини просядок на один ступень збільшує дію роботи вертикальних сил на колію приблизно на 5...10 %;

- при зменшенні модуля пружності підрейкової основи до 30 МПа, дія роботи вертикальних сил на колію збільшується в 1,4...1,7 разів, далі йде більш

різке погіршення процесу – при модулі пружності 20 МПа вплив дії на колію збільшується приблизно в 2 рази, а при 10 МПа – в 3,4...3,8 разів.

В додатку А наведені значення модуля пружності підрейкової основи для різних конструкцій залізничної колії, табл. А.1, та рекомендації критеріїв якісної оцінки деформативності колії, які наведені в табл. А.2, що отримані в ДР №0107U005240. Оскільки при визначенні нормативних величин застосовують модуль пружності 50 МПа, то справному стану колії за [5] відповідає технічний стан залізничної колії при модулі пружності що задовольняє оцінці «відмінно».

Отже, обґрунтовано можливість застосування величин роботи діючих на колію сил, як параметр за яким можливо визначити ступень зношування колії, і як наслідок, величину витрат на її ремонт та термін роботи. Тобто порівняння значень роботи отриманих для конкретних умов зі значеннями отриманих за нормативними умовами надає змогу оцінювати строки призначення ремонтів з урахуванням характеристик рухомого складу та фактичного стану колії. Таким чином, за табл. 4.1 [335] встановлюються умови експлуатації ділянки, за якими визначаються нормативні значення роботи колії. Міжремонтні схеми встановлюються за критеріями проведення ремонтів колії наведеними в табл. 4.3...4.9 [335] та зі врахуванням п. 4.4.1 [335]. За фактичними даними ділянки визначаються фактичні значення роботи колії. Порівняння нормативних та фактичних значень роботи дозволяє оцінити можливість подовження або скорочення термінів служби колії.

### **2.3.Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для визначення напружено-деформованого стану елементів магістральної та промислової колій**

Моделі, за якими встановлені допустимі та рекомендовані значення напружень елементів колії у нормативних документах, повністю виконують поставлені задачі щодо визначення несучої здатності елементів, але вони вирішують її в квазідинамічній постановці. Тому спочатку необхідно розробити інструмент на основі якого можна розглядати зазначене питання.

В процесі вивчення існуючих напрямків розвитку моделей, що наведені в першому розділі, та зіставляючи їх придатність щодо описання фізики процесу взаємодії колії і рухомого складу, дійшли висновку, що необхідно застосовувати моделі, що визначають параметричні дані розповсюдження взаємодії колії та рухомого складу. Оскільки необхідно отримати результати розповсюдження деформативного процесу колії за часом їх впливу з урахуванням зворотної реакції елементів, то слід розглядати моделі, які засновані на положеннях теорії розповсюдження пружних хвиль, так як за цією теорією можливо отримати данні щодо поширення процесу за часом.

Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення завдань напружено-деформованого стану твердого тіла описані в ряді фундаментальних робіт класичної фізики. В якості теоретичної основи були прийняті роботи [342...346]. Стосовно моделювання роботи залізничної колії ці методики раніше практично не застосовувалися, тому в сучасній літературі майже відсутні описи аналогічних досліджень. Деякі ідеї використання даного напрямку фізики для вирішення завдань залізничної колії висловлювалися в кандидатській дисертації Вострухова А. В. [347] і в докторській дисертації Суворовой Т. В. [348]. Однак ці роботи мали за мету розробку математичного апарату для розв'язання ряду задач теорії пружності, і тільки в якості прикладного використання, в тому числі пропонувалися задачі вібраційного впливу на залізничну колію і прилеглі будівлі. Але всі існуючі моделі відносяться до плоских, і тому не можуть повністю вирішити поставлену задачу.

Згідно з існуючою теорією розповсюдження пружних хвиль, вони поділяються на об'ємні, поверхневі, каналізовані та хвильовідні. Поверхневі

хвилі є результатом виходу об'ємних хвиль на вільну поверхню. Каналізовані хвилі є результатом розповсюдження об'ємних хвиль в тонких стрижнях, пластинах та плівках. Каналізовані хвилі є результатом розповсюдження об'ємних хвиль вздовж канавок та виступів, що розташовані на вільних поверхнях. Відповідно до лінійної теорії пружності в однорідному ізотропному середовищі при динамічному впливі на нього в будь-якій точці виникають два види об'ємних хвиль: поздовжні стиску  $P$  і поперечні зсуву  $S$ . Останні, можуть бути двох типів: типу  $SH$  - коливання частинок перпендикулярно розповсюдженню хвилі та паралельно шаруватості і типу  $SV$ , при яких коливання частинок перпендикулярно розповсюдженню хвилі та перпендикулярно шаруватості. Поперечні хвилі не можуть поширюватися в рідких і газоподібних середовищах, так як ці середовища не володіють пружністю форми. У них можуть поширюватися лише поздовжні хвилі, які викликають коливання часток вздовж напрямку розповсюдження хвилі. Швидкість розповсюдження хвиль в земляних конструкціях за [349] наведена в табл. 2.1

Таблиця 2.1

### Швидкості пружних поздовжніх $V_p$ та поперечних $V_s$ хвиль

Типи ґрунтів	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с	$V_s/V_p$
Водоненасичені			
валуно-галечні відкладення	500-1000	250-500	0,60-0,70
піски	200-500	150-300	0,50-0,70
супіски	250-700	150-400	0,45-0,60
суглинки	300-1000	150-500	0,30-0,55
глини (включаючи коренні)	400-1800	200-600	0,15-0,35
Водонасичені			
валуно-галечні відкладення	2000-2700	250-500	0,10-0,20
піски	1500-2000	150-300	0,10-0,18
супіски	1500-1800	150-400	0,10-0,20
суглинки	1500-1900	150-500	0,10-0,25
глини (включаючи коренні)	1800-2500	200-600	0,10-0,25

За умовами виникнення, хвилі можуть бути плоскими, циліндричними та сферичними. Враховуючи умови виникнення хвиль, фізичний процес

контактування коліс з рейками, при дослідженні його подальшого розповсюдження, може бути описаний тільки сферичними хвилями. Отже, необхідно розглядати процес виникнення (збудження) та розповсюдження об'ємних сферичних хвиль, з урахуванням їх природних властивостей. На рис. 2.16 наведено фронт розповсюдження силової хвилі та напрямки коливання часток відносно напрямку розповсюдження хвилі.



1 – напрямок розповсюдження поздовжніх хвиль P;  
2 та 3 – напрямки розповсюдження поперечних хвиль S, відповідно SV та SH.

Рисунок 2.16 – Схема фронту розповсюдження хвилі та напрямків коливання часток відносно напрямку розповсюдження хвилі

Недоліком при експериментальному дослідженні даного питання є те, що вимірювальна техніка, що застосовується в експериментах має невелику, як до справжніх випромінювань хвиль, частоту запису. В табл. 2.2 наведено інформацію щодо оцінки квазівібрації. Так, якщо розглянуто існуючу квазідинамічну модель, що застосовується в розрахунках колії на міцність, при русі рухомого складу на колію 30 км/год., при повному ігноруванні реакції елементів конструкції колії на динамічний вплив рухомого складу, за одну секунду на цифровому запису повинні отримати: 87 відбитих хвиль від всієї конструкції, 335 - без земполотна, 457 - без піщаної подушки і земполотна, 5400

- без сипучої основи, 14000 - тільки від рейки. Всього - 20288 імпульсів. Крім зазначених спрощень не враховано, як найменш п'ять поверхневих процесів.

Зараз максимальна частота дискретизації запису цифрової апаратури дослідної лабораторії 4 кГц [20, 39], тобто між суміжними вимірами проходить 1/4000 сек.

Таблиця 2.2

### Оцінка процесу квазівібрації

Елемент	$V_p$ , м/с	Товщина елемента, м	Час проходження, с	Кількість проходів хвилі за 1 с в обидві сторони	Кількість імпульсів на 1 вимір
рейка	5100	0,18	3,52941E-05	28000	7
шпала	3500	0,2	5,71429E-05	17500	4,375
щебінь	400	0,4	0,001	1000	0,25
пісок	500	0,2	0,0004	2500	0,625
супісок	700	3	0,004285714	200	0,05

Таким чином, необхідно розробити динамічну просторову модель розповсюдження хвиль в конструкції колії з урахуванням того, що точність розрахунку повинна коливатись в межах 0,0001...0,000001 с, в залежності від характеристик матеріалів елементів колії. Перші спроби розроблення таких моделей наведено у [18, 19, 21, 22, 37, 40, 42, 44...46], на досвіді яких ґрунтуються наступні дослідження.

В квазідинамічних моделях прикладається циклічна сила (переміщення сили з фази тиску на фазу розтягу і навпаки) в одному перетині. Для визначення максимальних значень параметрів напружено-деформованого стану колії це припущення не впливає на остаточний результат. Але якщо розглядати динамічний вплив рухомого складу, то сила прикладається в різні ділянки, при чому вона не «падає», а перекочується, тобто передається плавно в різні ділянки і тільки в фазі тиску на них. Отже, щоб описати механізм впливу рухомого складу на колію, за допомогою теорії розповсюдження пружних

хвиль, необхідно представити як послідовне збудження площадок контакту рейок з колесами, що розташовані за траєкторією руху колісної пари, з урахуванням часу появи та дії навантажень в них, що залежать від швидкості руху поїздів.

При збудженні будь якої поверхні силою, що має вертикальну та горизонтальну складові, відбувається розповсюдження чотирьох хвиль: двох поздовжніх та двох поперечних різної поляризації. Таким чином, за допомогою застосування теорії розповсюдження пружних хвиль, результатом розповсюдження силової хвилі, від збудження контактної площадки, є суперпозиція двох фронтів об'ємних сферичних хвиль, що поширюються відповідно своїм властивостям, а визначення напружено-деформованого стану елементів залізничної колії виконується за напрямками розповсюдження хвиль.

#### **2.4. Удосконалення методу визначення параметрів напружено-деформованого стану елементів залізничної колії для дослідження їх деформативної роботи**

При дослідженні процесу деформативності в системах конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії необхідно точне визначення цього процесу як в часі, так і в просторі. Таким чином необхідно правильно описати процес розповсюдження збуджень від рухомого складу, що протікає в зазначених елементах. Основні теоретичні положення і принципи, щодо опису особливостей деформативної роботи елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії полягають у наступному:

- питання вивчення динаміки суцільних тіл це питання вивчення розповсюдження коливань в певних контактуючих обмежених середовищах;

- деформативна робота елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії уявляє собою роботу, що виконується при коливанні суцільної системи;

- елементи системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії уявляє собою систему суцільних тіл, що володіють властивістю дисипації;

- передача збуджень рухомого складу елементам системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії передається за рахунок розповсюдження вільних та вимушених коливань;

- при будь-яких початкових умовах рух точки протягом часу буде складатись тільки з вимушених коливань. Початкові умови вироджуються разом з вільними коливаннями, які поступово затухають;

- не звертаючи уваги на наявність опору руху, вимушені коливання є гармонічними та відбуваються з частотою вимушених коливань, тобто частотою зовнішньої сили.

Формування вихідних даних, щодо опису особливостей деформативної роботи включає:

- тип рухомого складу, його швидкість та навантаження, що формують значення та місця впливу діючої сили та частоту імпульсу зовнішньої сили, яка характеризує амплітуду коливань;

- стан рейки та колеса, що формують площадку контакту;

- геометрія кожного елемента та вид контакту для всіх елементів, що характеризують геометрію розповсюдження коливань;

- характеристики елементів конструкції за матеріалами, з яких вони виготовлені (модуль пружності, щільність, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнти тертя та зчеплення, як самих матеріалів, так і контактуючих пар, імпеданс), що характеризують кількісно процес розповсюдження коливань.

Для оцінки процесу деформативної роботи колії складаються розрахункові схеми конструкції колії при наступних передумовах:

1) залізнична колія розглядається як просторова система об'єктів, що уявляє собою зборку елементів конструкції колії, які характеризуються

геометричними розмірами і фізичними властивостями, відповідно до нормативної літератури, що визначають напрямок і швидкості поширення хвиль, тобто якісну оцінку процесу деформативної роботи колії;

2) на залізничну колію діють масові (тяжіння та інерції) та поверхневі (результати дії дотичних елементів) сили  $f_i$ , що визначають кількісну оцінку процесу деформативної роботи колії;

3) залізнична колія являє собою систему суцільних середовищ, що володіють властивістю стискання ( $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{m}{\Delta V} \neq const$ ) з певними законами поведження;

4) середовища володіють пружними силами та внутрішнього тертя, які базуються на передумові, що відновлюючі сили пропорційні амплітуді коливань, а дисипативні – швидкості процесу розповсюдження;

5) розглядається рух сполушного середовища - континуума – в евклідовому просторі з використанням абсолютного часу.

Основна система рівнянь руху сполушного середовища виводиться на основі законів механіки Ньютона. Але вона не замкнута, тому доповнюється її термодинамічними та фізичними співвідношеннями.

Для виведення рівнянь застосовано як метод Лагранжа, так і метод Ейлера, тобто розглядається рух, з одного боку, певної частки середовища, та з другого – прийнято до уваги наявність заданого поля швидкостей.

$$\frac{d^2 \bar{u}}{dt^2} = \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}, \nabla) \bar{v}, \quad (2.2)$$

де  $\frac{d\bar{v}}{dt}$  - локальна зміна швидкості, що відбувається в певній точці простору за рахунок не стаціонарності поля швидкостей;

$v_i \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_i}$  - конвективна складова, що є слідством неоднорідності поля швидкостей, зміна швидкості переміщення певної частки за час  $dt$  по дузі  $dl$ .

Локальна частина прискорення дорівнює нулю, якщо поле швидкостей стаціонарно (залежить тільки від координат та не залежить від часу). Конвективна складова дорівнює нулю, якщо поле швидкостей однорідне.

У випадку стаціонарного поля швидкостей лінія току (крива, що проведена в даний час середовища, та в кожній її точці вектор швидкості направлений по дотичній до неї) і траєкторія співпадають.

Сукупність ліній току утворює поверхню. В кожній точці цієї поверхні вектор швидкості  $\vec{v}$  лежить в дотичній площині.

Якщо  $f(x_1, x_2, x_3) = const$  - рівняння поверхні току, тоді  $(\vec{v}, \text{grad}f) = 0$ .

На колію, в зоні площадок контакту рейок і коліс, діє зовнішня сила від впливу рухомого складу.

$$F = F_{\max} \sin \omega t, \quad (2.3)$$

де  $F_{\max}$  - максимальне значення сили при дії рухомого складу на колію, тобто її амплітуда,

$\omega t$  - коливається від 0 до  $\pi$ , та за цей час  $t$ , що залежить від швидкості руху, колесо проходить весь цикл впливу на колію: тиск з'являється, поступово збільшується до максимального, та згасає.

Сила до кожної площадки прикладається в локальній системі координат, та весь процес розповсюдження відбувається в локальних системах координат, які приводяться до загальної системи координат. Сила завжди прикладена в точці початку локальної системи координат, та завжди співпадає з вертикальною віссю цієї локальної системи координат.

Рівняння хвилі, що розповсюджується від дії зовнішньої сили для певної точки:

$$s(x, y, z, t) = A e^{-\frac{bt}{2m}} \sin \left( t \sqrt{\omega_0^2 - \frac{b}{2m}} + \alpha \right) + B \sin(\omega t + \beta), \quad (2.4)$$

де  $A, B$  - амплітуди внутрішніх відповідно власних та вимушених

коливань;

$b$  - коефіцієнт опору середовища;

$m$  - маси, що задіяні в процесі деформування на кожний момент часу;

$\omega, \omega_0$  - частота впливу відповідно, зовнішнього впливу та власна частота системи конструкцій верхньої та нижньої будов, на певний момент часу;

$\alpha, \beta$  - фази відповідності зовнішніх та внутрішніх відповідно власних та вимушених коливань.

Таким чином, постановка динамічної задачі по визначенню процесу деформативної роботи залізничної колії зводиться до того, що в заданій області  $\Omega$  необхідно знайти поля напружень  $\sigma_{ij}$ , деформацій  $\varepsilon_{ij}$  переміщень  $u_{ij}$  та щільності  $\rho_{ij}$  що задовольняють рівнянням в будь-який момент часу  $t$ :

руху:

$$\nabla^2 u_i + \frac{1}{1-2\nu} \theta_{,i} = -\frac{\rho}{\mu} \left( f_i - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right) \quad (2.5)$$

з граничними умовами:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i \quad (2.6)$$

залежностей Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \\ \theta &= J_1(\varepsilon_{ij}) = \text{div} u \end{aligned} \quad (2.7)$$

залежностей Коші:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.8)$$

збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \bar{v} = 0 \quad (2.9)$$

Одиничність рішення досягається шляхом формування початкових умов:

$$\begin{cases} u|_{t=0} = \varphi_0(x, y, z), \\ \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \varphi_1(x, y, z); \end{cases} \quad (2.10)$$

або:

$$\begin{cases} u|_{t=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = 0; \end{cases} \quad (2.11)$$

та граничних умов:

$$u|_s = f(x, y, z). \quad (2.12)$$

Рішення рівнянь за ф. 2.5...2.12, приводять до системи рівнянь щодо визначення складових переміщення  $u_x, u_y, u_z$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\rho k s_x}{\mu V_i} + \frac{\rho h \partial s_x}{\mu \partial t} - \rho K g + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\rho k s_y}{\mu V_i} + \frac{\rho h \partial s_y}{\mu \partial t} - \rho L g + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\rho k s_z}{\mu V_i} + \frac{\rho h \partial s_z}{\mu \partial t} - \rho M g + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \\ \left( \lambda \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) Z = \tau_z. \end{cases} \quad (2.13)$$

де  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона;

$k$  - коефіцієнт пружності;

$h$  - коефіцієнт внутрішнього тертя;

$V_i$  - об'єм на певний момент часу;

$s_x, s_y, s_z$  - проекції переміщень на вісі  $x, y, z$ ;

$K_g, L_g, M_g$  - проекції масових сил на вісі  $x, y, z$ ;

$E$  - модуль деформації, МПа;

$G$  - модуль здвигу, МПа;

$\lambda = \frac{2\nu G}{(1-2\nu)} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ,  $\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  - постійні пружні Ламе;

Всі рівняння належать до неоднорідних диференціальних рівнянь гіперболічного типу другого порядку з частковими похідними. Тому послідовність рішення буде однаковою, вона наведена нижче, а складову за напрямком у формулах позначено  $j$ .

$$\left( \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \right) \frac{\mu}{\rho} + \left( Kg - \frac{k}{V_i} s_j - \frac{h}{V_i} \frac{\partial s_j}{\partial t} \right) = \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}. \quad (2.14)$$

Загальне рішення визначається як:

$$u_j = \int_0^t v_j(x, y, z, t, \tau) d\tau, \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \int_0^t \frac{\partial^2 v_j}{\partial t^2} dt + \left( Kg - \frac{k}{V_i} s_j - \frac{h}{V_i} \frac{\partial s_j}{\partial t} \right),$$

Надалі вирішують однорідні рівняння типу:

$$v_j = T(t)X(x)Y(y)Z(z); \quad (2.16)$$

залежності незалежних змінних визначаються з наступних рівнянь:

$$\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + k_1^2 T(t) = 0, \quad \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + k_2^2 X(x) = 0, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + k_4^2 Y(y) = 0, \quad \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + k_5^2 Z(z) = 0. \quad (2.18)$$

Результатом однорідних рівнянь є наступна залежність:

$$v_j = \frac{\sqrt{\rho}}{2\sqrt{\mu k_1}} (K_g + K_U sj - K_T sjt) \sin\left(\frac{\sqrt{\mu k_1}(t - \tau)}{\sqrt{\rho}}\right), \quad (2.19)$$

з власною функцією:

$$k_1 = \sqrt{\frac{\pi^2(n^2 + l^2)}{C_i^2 t^2} + \frac{\pi^2 m^2}{C_i^2 t^2}}, \quad (2.20)$$

де  $K_g, K_U, K_T$  - проекції масових, пружних та сил тертя на вісі  $x, y, z$ ,  
 $n, l, m$  - цілі числа.

Коректність рішення досягається відповідною стійкістю за Ляпуновим.

Розрахункові схеми щодо дослідження процесу деформативної роботи колі елементів колії, мають свої особливості. По-перше, рішення диференціального рівняння однозначно визначаються початковими умовами. Так, якщо розглядається коливання будь-якої точки певної ділянки з системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії, то початковими умовами є відсутність впливу рухомого складу. По-друге, при безперервній зміні початкових даних відповідне рішення змінюється безперервно. Це означає, що при появі впливу рухомого складу, який буде спочатку наближуватись, а потім віддалятися від будь-якої точки ділянки зазначеної системи, будуть змінюватись початкові дані щодо впливу рухомого складу від її повної відсутності до максимальних значень і навпаки. За цими даними будуть змінюватись характеристики напружено-деформованого стану точки, які призводять до зміни деформативного процесу на ділянці. По-третє, значення функції в будь-якій точці ділянки системи залежить не від всієї сукупності початкових даних, а тільки від початкових даних вздовж частини початкової

поверхні впливу, яка вирізається з загальної поверхні впливу характеристиками, що виходять з точки. Тобто, зміни характеристик точки ділянки залежать не від всієї поверхні, по якій контактують колеса з рейкою при проході рухомого складу по ділянці, а тільки від тієї частини, що на даний час передала вплив рухомого складу на точку.

Окрім того, при розгляданні такої задачі буде виконано принцип Гюйгенса. Для визначення поведження системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії обов'язковість виконання цього принципу є необхідною. Згідно принципу Гюйгенса, початкове збурювання, локалізоване у просторі, викликає в кожній точці простору вплив, локалізований в часі, при цьому має місце поширення хвилі з переднім і заднім фронтами хвиль. Зазначений принцип може виконуватись тільки при розгляді чотирьох мірного простору: зміни об'єму в часі. Його врахування дає можливість розглядати процес деформативності в повному обсязі, причому максимальні прогини елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії не збігаються в часі за перетином та впливають на деформації елементів зазначеної системи та деформативність самої системи.

З врахування того, що початкові умови змінюються, прийнято, що розповсюдження впливу рухомого складу на систему конструкцій верхньої та нижньої будов колії відбуваються за сферичними хвилями. Сферичні хвилі визначаються такою властивістю, що відповідне сімейство характеристичних поверхонь складається з характеристичних коноїдів, вершини яких лежать на лініях тимчасового типу. Сферичні хвилі для будь-яких ліній тимчасового типу з властивістю за принципом Гюйгенса існують тільки у випадку чотирьох перемінних і притому тільки для диференціальних рівнянь, еквівалентних хвильовому рівнянню.

При моделюванні за запропонованим методом необхідно врахувати наступні особливості:

- довжина розглянутої ділянки повинна бути не менше ніж сума подвоєного добутку швидкості розповсюдження хвилі за напрямком для

найбільш твердого матеріалу і часу дії сили в одному перетині та довжині ділянки на якій розглядається рух. Так для розгляду одного перетину колії довжина ділянки становить 25 м ;

- для достатньої точності опису процесу шаг його просування має складати 1 мм. Так для рейок порядок шагу виконання розрахунку становить 0,000001 с, для баласту 0,0001 с;

- якщо розглядається рух декількох сил, що рухаються в одному напрямку, то слід розглядати тільки ту їх кількість, що розташовані на довжині добутку швидкості розповсюдження хвилі за напрямком для найбільш твердого матеріалу і часу дії сили в одному перетині;

- при розрахунках неможна відкидати частини конструкції керуючись її симетрією якщо вони розташовані на довжині менш ніж добуток швидкості розповсюдження хвилі за напрямком для найбільш твердого матеріалу і часу дії сили в одному перетині.

## **2.5.Метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу**

Зараз вважається, що проблема визначення різноманіття сил, які діють на залізничну колію, вирішена з достатньою для практичних потреб строгістю. І вся практика підтверджує правильність положення, що виникаючи в колії зусилля, напруження та деформації підкоряються імовірнісним та стохастичним закономірностям. Так як дослідження різноманітних механічних характеристик залізничної колії показують, що такі її характеристики як модуль пружності, пружні характеристики матеріалів, з яких виготовлено елементи конструкції колії, розміри колії та окремих її елементів, що виміряні в різних точках ділянки колії, можуть бути описані тільки імовірнісними закономірностями. Також варіації в конструктивному оформленні і

технологічному виготовленні одного і того ж типу екіпажу заставляють підходити до питання про з'ясування впливу будь-якого екіпажу на рейки, як до задачі теорії імовірності. Таким чином теорія взаємодії колії і рухомого складу є одною з гілок загальної статистичної механіки. І дає можливість розгляду і опису роботи колії у часі за всіма глобальними параметрами механічної системи.

Всі системи володіють енергією – одним з основних понять фізики, що використовується при розрахунках і пояснює механічні, теплові і електричні явища. Однією з важливих проблем техніки є отримання, передача та використання енергії.

Якщо розглядати колію як модель створену засобами теорії розповсюдження пружних хвиль, що уявляє собою систему об'єктів, яка володіє властивістю замкнутої системи, то цілком можливо використовувати всі закони збереження. Що таким чином, дає можливість говорити про зміну енергії як системи в цілому, так і кожного елемента колії зокрема за будь-який час роботи, тобто протягом деякого часу.

Адаптація зміни енергії конструкції колії і кожного елемента зокрема до норм та допусків улаштування та утримання надає можливість перейти до визначення її (та їх) стану в залежності від умов експлуатації та утримання.

Величини зміни енергії дозволяють прогнозувати стан колії, тобто оцінювати та передбачати поведінку колії та її об'єктів з визначеною імовірністю, із врахуванням впливу кожного об'єкту конструкції колії та кожного параметру впливу самого об'єкту при певних впливах рухомого складу та системи утримання колії.

За першим законом термодинаміки:

$$\delta K + \delta U = \delta A + \delta Q \quad (2.21)$$

Значення зміни кінетичної енергії становить:

$$\delta K = \left( \frac{\partial K}{\partial t} \right) \delta t = \iiint_V \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \delta u_i \rho dV \quad (2.22)$$

Значення зміни роботи, що здійснюється зовнішніми силами за той же елемент часу  $\delta t$  становить:

$$\delta A = \iiint_V (\sigma_{ij,j} + \rho f_i) \delta u_i dV + \iiint_V \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dV \quad (2.23)$$

Зміна внутрішньої енергії тіла  $\delta U$  дорівнює сумі зміни роботи деформації та теплової енергії  $\delta Q$ , що передається тілу.

$$\delta U = \iiint_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \delta Q \quad (2.24)$$

Рівняння теплопровідності в просторі – однорідне:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

де  $x, y, z$  - відповідно координати,

$t$  - час,

$u$  - температура в точці,

$a$  - відомий коефіцієнт,

$$u(t=0) = \varphi(x, y, z)$$

В кожній точці поверхні  $S$  конструкції колії задається температура:  $u|_S = \Psi_1(P, t)$ ,  $\Psi_1(P, t)$  - відома функція точки поверхні  $S$  та часу  $t \geq 0$ .

За цим розповсюдженням визначається кількість теплової енергії.

Далі встановлюються залежності процесів деформативності та кількості енергії, що необхідно витратити на деформативну роботу колії, та необхідно

витратити на деформативну роботу, та через зв'язок зі станами надійності прогнозується поведження конструкції колії при певних умовах протягом терміну служби елементів та конструкції колії.

Для рішення питання стосовно забезпечення повноти безпеки роботи конструкції колії протягом терміну експлуатації необхідно, по-перше, сформуванню комплекс оціночних умов за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії відповідно міждержавному стандарту ГОСТ 32192-2013. По-друге, для кожного елементу конструкції колії сформуванню комплекс оціночних умов станів надійності елементів колії за допустимими відхиленнями конструкції та властивостей матеріалу, що відбуваються в процесі експлуатації та впливають на їх функціонування протягом експлуатації. Зазначена пропозиція передбачає проведення подальших додаткових експериментів. По-третє, з використанням запропонованих критеріїв деформативної роботи, визначити вплив сукупної зміни станів елементів на функціонування конструкції колії та за існуючими вимогами влаштування й утримання конструкції колії, сформуванню комплекс оціночних умов станів колії за допустимими відхиленнями в елементах конструкції колії. Для останньої пропозиції достатньо розробити математичну модель, що дозволить, на основі першої і другої пропозицій та існуючої нормативної документації, сформуванню комплекс оціночних умов станів надійності конструкції колії за станами надійності елементів колії.

Для оцінки та прогнозування життєвого циклу функціонування залізничної колії, на основі вищенаведених пропозицій, запропоновано алгоритм методу оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу наведений на рис. 2.17.

Одні елементи колії мають термін експлуатації, що виражається в млн. т. бруто, певні елементи мають термін експлуатації, що виражається або в циклах навантаження або в календарних одиницях, деякі мають термін експлуатації за економічними міркуваннями, інші елементи зовсім не мають встановленого терміну експлуатації. Але кожен елемент має виконувати свої

функції таким чином, щоб конструкція колії функціонувала надійно та безпечно.

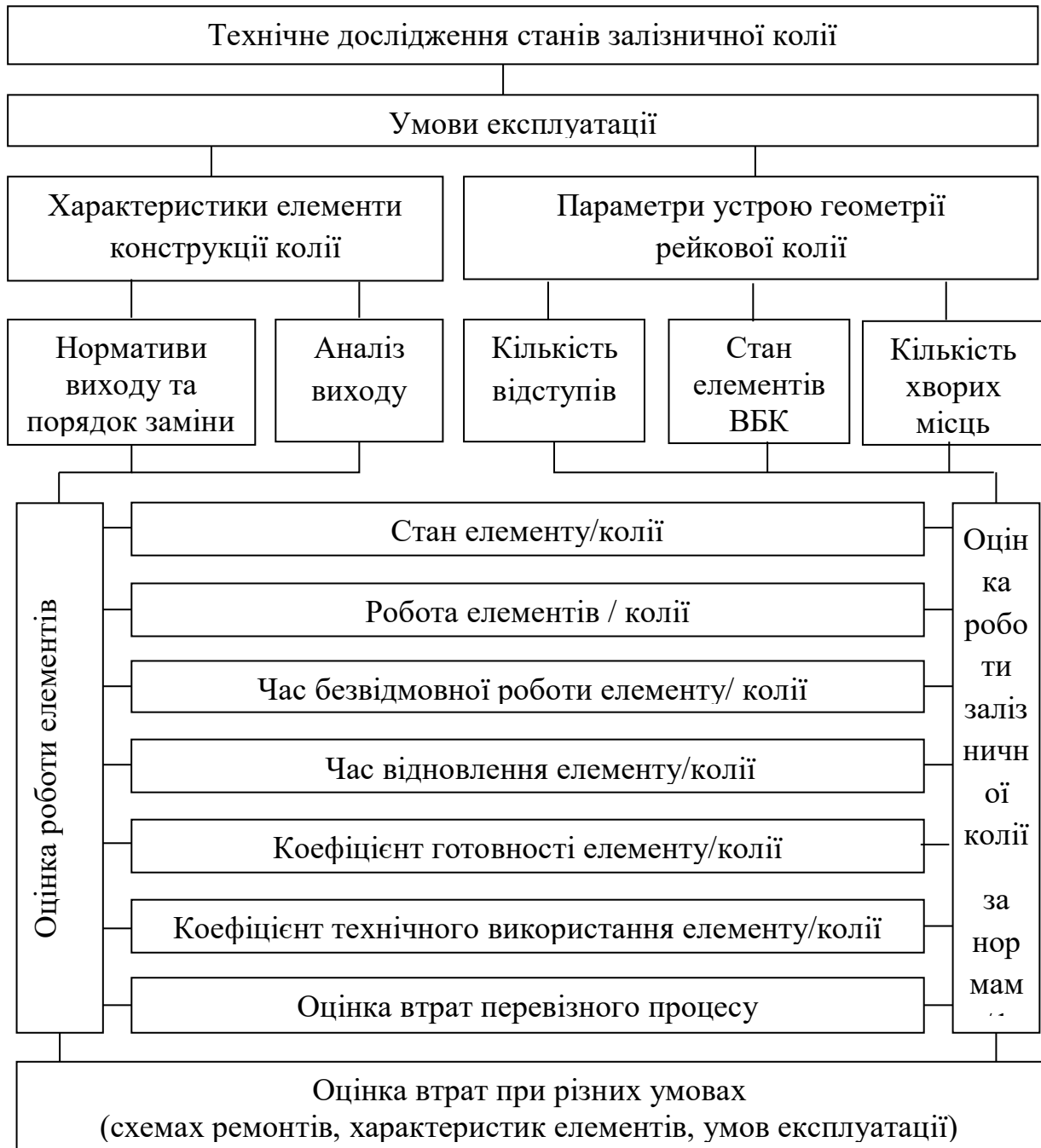


Рисунок 2.17 - Алгоритм методу оцінки деформативної роботи колії

Узагальнюючим показником, що поєднає роботу всіх суцільних елементів за часом є деформативна робота елемента конструкції колії, що запропонована в роботі в якості критерію:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} P y dt , \quad (2.26)$$

де  $P$  - сила, що діє на елемент;

$y$  - переміщення, яке сила викликає під час впливу  $[t_1; t_2]$  .

Роботу елементів колії можна оцінити за показниками витривалості отриманими в експериментах. Тобто отримати залежності зміну стану елементів від певної кількості прикладання навантаження для певного співвідношення величин навантажень та фізико-механічних і геометричних характеристик елементів. За якими встановити при яких значеннях роботи в елементах відбуваються руйнівні зміни. Отримані залежності та знання нададуть змогу прогнозувати поведінку елементів при моделюванні. А порівняння фактичних умов роботи елементів зі встановленими за нормативною документацією дасть можливість прогнозувати термін роботи елементів, та коригувати умови роботи або фізико-механічні і геометричні характеристики елементів в залежності від потрібного терміну експлуатації. Приклад методики аналізу виходу елементів колії для отримання часу їх безвідмовної роботи показано в роботах [14, 17, 38]. Приклад врахування зміни фізико-механічних та геометричних властивостей елементів на їх роботу показано в [24, 43].

Оскільки величини переміщень у всіх елементів колії мають просторовий характер навіть для одного перетину колії, пропонується використовувати запропонований в роботі критерій деформативної роботи конструкції колії  $A$  , як суму робіт, що виконують всі елементи конструкції колії в одному перетині від впливу рухомого складу з урахуванням часу сприймання та реакції елементів на вплив:

$$A = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} A_i . \quad (2.27)$$

де  $A_i$  - робота окремого елемента конструкції колії в інтервалі часу переробки впливу сили на елемент  $[t_1; t_2]$  ,

$n$  - кількість елементів, що сприймають навантаження від впливу рухомого складу.

При порівнянні фактичних значень роботи колії зі значеннями, що отриманні при врахуванні умов за нормативною документацією надасть можливість прогнозувати термін роботи колії з урахуванням режиму експлуатації та стану залізничної колії на ділянці, а також коригувати умови роботи або системи проведення ремонтів та технічного обслуговування.

Для застосування зазначеного методу розроблено математичну модель роботи конструкції залізничної колії з урахуванням просторового розповсюдження пружних хвиль при взаємодії колії та рухомого складу. Зазначена модель поєднує три блоки: механізм впливу рухомого складу на колію, розповсюдження силової хвилі в елементах конструкції колії та перехід силової хвилі з одного елемента в інший. Алгоритм розрахунку за розробленою моделлю наступний:

$$\begin{aligned} L_F &= \{\{a_1, a_2, a_i, \dots\}, \{b_1, b_2, b_i, \dots\}, \{\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots\}\}, P_F = f(L_F, V, F), T = \{\{t_1, t_2, t_i, \dots\}\}, \\ K &= \{\{\omega_1, \omega_2, \omega_i, \dots\}, \{s_1, s_2, s_i, \dots\}\}, \omega_i = \{\{g_{11}, g_{i2}, g_{ij}, \dots\}, \{\phi_{11}, \phi_{i2}, \phi_{ij}, \dots\}\}, \\ F_A &= \{\{A_{11}, A_{12}, A_{pl}, \dots\}, \{B_{11}, B_{12}, B_{sm}, \dots\}\}, Y = \{\{y_{11}, y_{12}, y_{ik}, \dots\}\}, \\ (\forall S_F = f(K, P_F, F_A)) &(\exists R_F = f(K, F_A), \forall \omega_i | K)(Y = f(P_F, R_F, T)), \end{aligned} \quad (2.28)$$

де  $L_F, a_i, b_i, \delta_i$  - відповідно: траєкторія руху коліс, довжина та ширина площадки контакту, зазор між колесом та рейкою в момент контакту;

$V, F, P_F, T, \omega_i, F_A, R_F, Y$  - множина відповідно: навантажень, швидкостей руху, параметрів імпульсу навантажень, часу, елементів колії, силових хвиль за напрямком, реакційних хвиль за напрямком, деформативних станів моделі;

$K, s_i, g_{ij}, \phi_{ij}, A_{pl}, B_{sm}, y_{ik}$ , - відповідно: збірка елементів колії, зв'язки між елементами,  $j$ -й елемент множини геометричних розмірів та фізико-механічних властивостей елемента  $\omega_i$ ,  $l$ -й,  $m$ -й елемент множини параметрів розповсюдження поздовжніх та поперечних хвиль за напрямком,  $k$ -й елемент деформативних станів елемента  $\omega_i$ .

Принцип складання геометричних моделей для запропонованої моделі аналогічний складанню геометричних моделей при застосуванні методу скінченних елементів. Геометричні моделі можуть бути побудовані в будь-якому програмному забезпеченні. Геометрія елементів відповідає діючим нормативам що зазначені у [334].

За фізичними характеристиками матеріалів елементів визначаються швидкості розповсюдження поздовжніх та поперечних хвиль в кожному елементі за напрямками розповсюдження.

На геометричній моделі конструкції колії визначаються координати траєкторії руху коліс рухомого складу. Ці координати є вирішальними для побудови систем локальних координат, в яких будуть розглядатись розповсюдження імпульсів, що прикладені вздовж рейки в певний момент часу як збуджувальний фактор. Геометричне розташування локальних координат обумовлено напрямком сили, що діє в певній точці від рухомого складу на рейку з дотриманням перпендикулярності кутів прикладання сили до обрису головки рейки. Значення величин сил, що діють на колію визначається за існуючими методиками. Час дії сили визначається відношенням довжини контактної площадки колеса з рейкою до швидкості рухомого складу. В наступних розділах більш детально описано властивості сили та принципи розповсюдження відносно конструкції колії. Але для запропонованої моделі геометричні параметри, що описують фізичний процес розповсюдження силової хвилі в елементах конструкції колії (рис.2.16), є основними.

Для введення граничних умов аналізуються умови контактування елементів колії між собою, та можливість деформації елементів. Величини та напрямки сил внутрішнього тертя визначаються з умови законів збереження енергії, для яких: швидкість зміни енергії повинна дорівнювати потужності діючої сили тертя. Величини та напрямки сил тертя між контактними площадками визначаються за законом Амонтона — Кулона, за яким вони дорівнюють добутку коефіцієнту тертя контактуючих пар та нормальної сили

реакції опри. Час дії та напрямок сил внутрішнього та зовнішнього тертя розраховуються для кожного напрямку розповсюдження імпульсу.

Визначення величини переміщень та напружень в елементах колії виконуються за удосконаленою моделлю наведеною вище. Величини деформативної роботи елементів та конструкції колії визначаються за ф. (2.26), (2.27).

Для визначення стану елементів колії та конструкції колії застосовується існуюча система отримання інформації за станом колії, що основана на оцінці різними засобами параметрів колії за елементами та геометричним положенням рейкової колії за [336].

Для визначення рівня раціональних швидкостей для всіх об'єктів, що складають ділянку, з розгляданням необхідності їх реконструкції і урахуванням зміни стану в часі в процесі експлуатації можна застосовувати метод, що наведено у [11] за допомогою моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки як набору об'єктів шляхом використання функцій множини.

## **2.6.Висновки по розділу 2**

1. Для вирішення однієї із поставлених задач введені:

- поняття «статична деформативність колії», «динамічна деформативність колії», «деформативна робота колії», «життєвий цикл деформативної роботи колії» які характеризують явища, що відбуваються в елементах та конструкції колії під впливом рухомого складу протягом терміну її експлуатації, що дозволило сформулювати загальні підходи до оцінки роботи залізничної колії магістрального та промислового транспорту;

- критерій оцінки деформативної роботи елементів колії, як показник механічної роботи елемента колії при впливі навантаження. Для отримання зміни стану елементів протягом терміну експлуатації запропоновано

застосовувати залежності зміни стану елемента від певної кількості прикладання навантаження з урахуванням руйнівних змін в елементі, що отримані експериментальним шляхом;

- критерій оцінки деформативної роботи конструкції колії під впливом рухомого складу, який враховує деформативні властивості елементів залізничної колії протягом часу впливу та реакції елемента на вплив навантаження.

Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль дозволило описати механізм впливу рухомого складу на колію імпульсами, які збуджують площадки контакту рейок з колесами, що розташовані за траєкторією руху колісної пари, з урахуванням часу появи та дії навантажень в них, що залежать від швидкості руху поїздів та надалі поширюється силовими хвилями.

Удосконалено метод визначення напружено-деформованого стану конструкції залізничної колії за допомогою моделювання процесу розповсюдження силової хвилі в конструкції колії. Для визначення параметрів взаємодії колії та рухомого складу при розповсюдженні силової хвилі:

- визначено передумови для складання розрахункових схем конструкції колії; сили, що задіяні в процесі розповсюдження навантажень на колію; величини, які характеризують процес розповсюдження навантажень;

- для визначення зміни напружено-деформованого стану елементів залізничної колії за напрямками розповсюдження, наведено рішення основної системи рівнянь руху середовища за допомогою розв'язання системи неоднорідних диференціальних рівнянь з частковими похідними другого порядку гіперболічного типу з парним числом незалежних змінних.

Розроблено метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу, який на базі поєднання існуючої інформації щодо діагностики станів елементів колії і геометричного положення рейкової колії та запропонованих критеріїв оцінки деформативної роботи елементів та конструкції колії дозволяє визначати раціональне, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов

експлуатації колії, міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії.

Для застосування запропонованого методу теоретичної оцінки деформативної роботи колії, складено та описано алгоритм розрахунку за розробленою математичною моделлю просторових коливань елементів конструкції залізничної колії як механічної системи, що дозволяє при моделюванні зовнішньої дії рухомого складу, з певною траєкторією руху коліс рухомого складу, виконувати дослідження динамічних деформативних процесів системи елементів конструкції залізничної колії із застосуванням положень теорій пружності та просторового розповсюдження пружних хвиль.

Результати, що наведені в розділі, опубліковані в [11...19, 21...24, 26, 28, 31, 34, 37, 38, 40, 42...45, 51...53].

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ

### 3.1.Методика проведення експерименту і обробки результатів

Експериментальні дослідження впливу на колію з конструкції із залізобетонними шпалами, пружинним кріпленням типу КПП-5, рейками UIC60 проводилися кафедрою «Колія та колійне господарство» і галузевої колієвипробувальною науково-дослідною лабораторією Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за участю автора. Випробування проведені на ділянці Київ-Миронівка Південно-Західної залізниці з метою визначення напружено-деформованого стану колії з рейками UIC60 і пружинним скріпленням КПП при різних швидкостях руху рухомого складу. Виміри проводилися під одним і тим же дослідним складом, схема якого представлена на рис. 3.1. Для проведення випробувань був сформований дослідний рухомий склад з двох електровозів ЧС-8 і двох пасажирських вагонів. Поїздки здійснювалися зі швидкостями 5, 100, 120, 130, 140, 155 км / год.

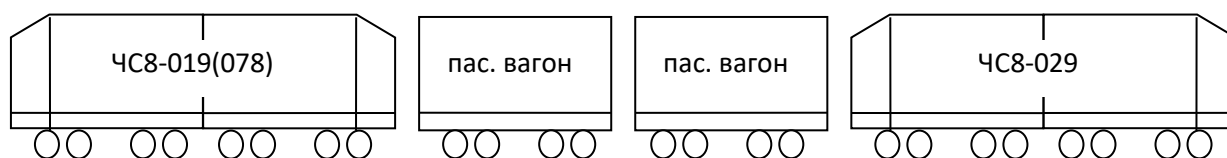


Рисунок 3.1 - Схема дослідного складу

Ділянка: план лінії - пряма, конструкція колії: безстикова колія з рейками типу UIC60, шпали залізобетонні, проміжне пружинне скріплення

типу КПП, все елементи колії нові. Епюра шпал - 1840 шт. / км, баласт щебеневий з товщиною шару під шпалою не менш 40 см.

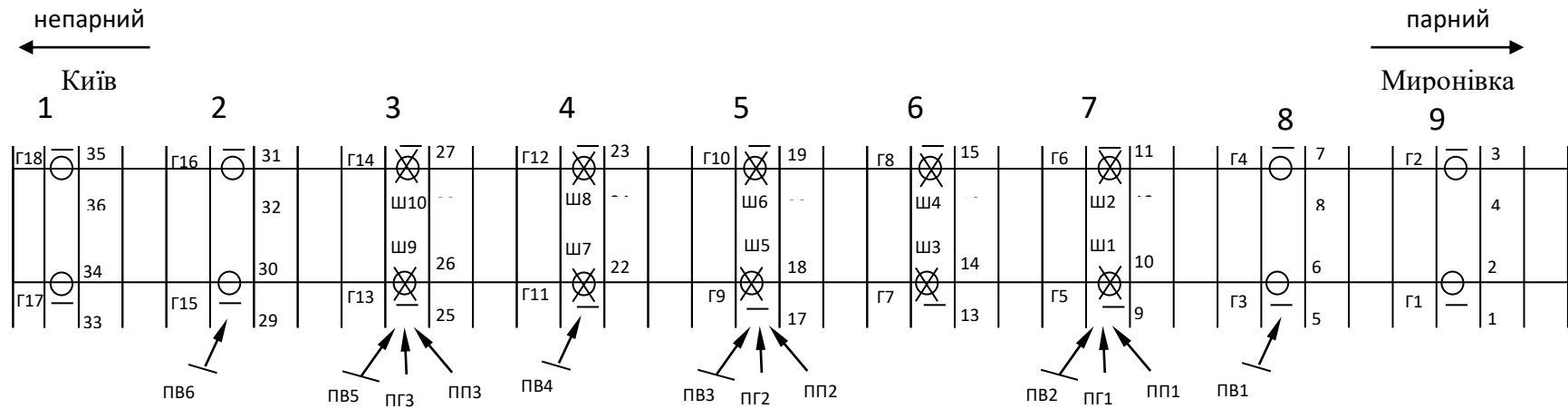
Початкова швидкість руху випробувального складу складала 100 км / год, максимальна 155 км / год. Підвищення швидкостей руху проводилося після експрес-аналізу з оцінкою значень максимальних вертикальних сил діючих на рейок, а також кромок напружень в рейках. Протягом випробувань проводилися інструментальні вимірювання досліджуваної ділянки. Тарування датчиків здійснювалася при русі дослідного складу зі швидкістю 5 км / год.

У процесі виконання робіт на дослідній ділянці колії визначалися наступні параметри:

- 1) напруження вигину в кромках підшви рейок;
- 2) напруження вигину на зовнішніх гранях головки рейок;
- 3) вертикальні сили (напруження) на шийці рейок;
- 4) горизонтальні і вертикальні переміщення головки і підшви рейок;
- 5) горизонтальні сили, що діють на закладні елементи скріплення;
- 6) характеристики пружності підрейкові основи.

Поїздки дослідного складу проводилися в прямому і зворотному напрямках. Кількість поїздок за будь-якої швидкості забезпечувало необхідну статистичну достовірність результатів.

Для реєстрації напружень, що виникають в процесі взаємодії колії та рухомого складу використовувалися тензометричні датчики, для вимірювання просторової деформації рейкових ниток – прогиноміри ЦНП МПС. Як реєструючі прилади використовувалися осцилографи і аналогово-цифрові перетворювачі з підсилювачем постійного струму. Пружність підрейкові основи визначалася за допомогою модульного вагону (вагон № 00000376) під час спеціально виділених «вікон». Схема дослідної ділянки з розміщенням приладів приведена на рис. 3.2.



- прилади для вимірювання напружень вигину в кромках підшви рейок;
- × прилади для вимірювання вертикальних сил, що діють на рейку;
- прилади для вимірювання напружень вигину в зовнішній грані головки рейок;
- ↗ прилади для вимірювання вертикальних переміщень підшви рейок;
- ↓ прилади для вимірювання горизонтальних переміщень головки рейок;
- ↘ прилади для вимірювання горизонтальних переміщень підшви рейок;

Рисунок 3.2 - Схема установки вимірювальних приладів на дослідній ділянці

Обробка результатів проводилася в такий спосіб. За показаннями кожного датчика при заданій швидкості руху і напрямку складалася первинна вибірка, на підставі чого здійснювалася статистична обробка дослідних даних.

Для кожної вибірки визначалися за стандартною методикою основні статистики: середнє, середньоквадратичне відхилення і максимально можливе значення при прийнятому в розрахунках колії на міцність рівні ймовірності 0,994. Ці вибірки групувалися для однієї або декількох осей кожного екіпажу. За результатами статистичної обробки вимірювань визначилися:

- 1) найбільші ймовірні значення динамічних сил, напружень і деформацій для порівняння з допустимими і рекомендованими значеннями;
- 2) залежність середніх і максимальних значень динамічних характеристик від швидкості і напрямку руху;
- 3) найбільші спостережувані значення динамічних сил, напружень та деформацій.

Визначення модуля пружності колії ґрунтується на стандартній методиці [87, 102]. Результати вимірювань записувалися на міліметрових планшетах у вигляді петлі гістерезису. Розшифрування виконано по лінії навантаження, при цьому вона була спрямована на відрізках. Необхідний для визначення горизонтального поперечного модуля пружності колії коефіцієнт, що залежить від типу рейок, знаходився за стандартною методикою, центр кручення рейок типу UIC60 був визначений за допомогою методу скінченних елементів. Для рейок типу UIC60  $\lambda \approx 1,9$ , а для рейок типу R65  $\lambda \approx 1,6$ .

### 3.2.Результати натурного експерименту

Для оцінки стану колії на дослідній ділянці виконані натурні вимірювання ручними вимірювальними приладами. На рис. 3.3 і 3.4 представлені графіки стану колії до і після випробувань. Перетину розташовані згідно рис.3.2.

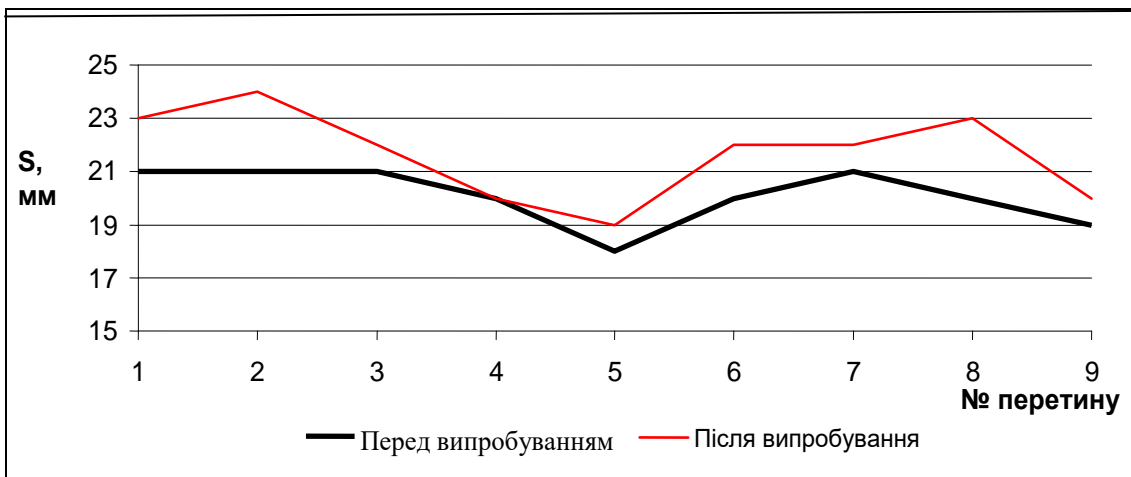


Рисунок 3.3 - Ширина колії на дослідній ділянці

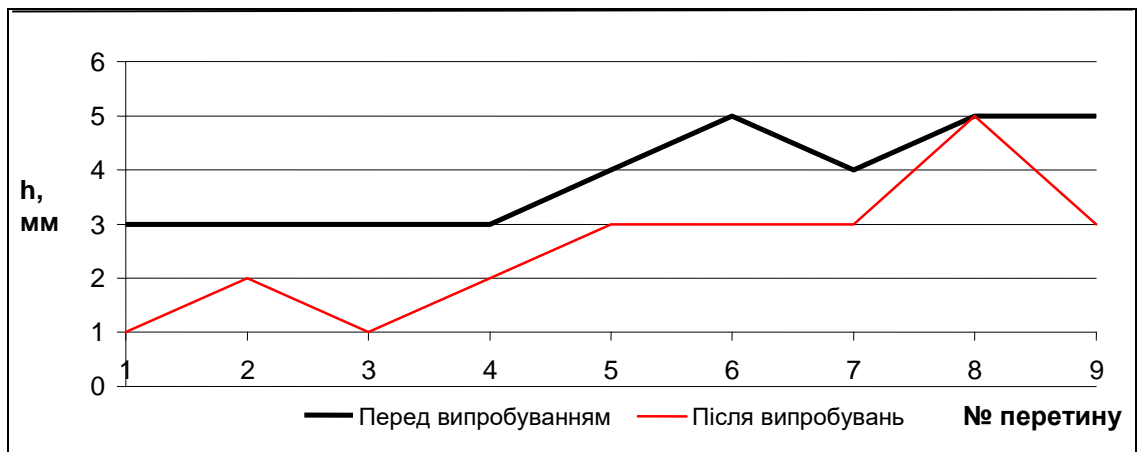


Рисунок 3.4 - Стан колії за рівнем на дослідній ділянці

Стан колії на дослідній ділянці відповідає вимогам «Інструкції по устрою та утриманого колії залізниць України та оцінювалося відмінно. На основі аналізу отриманих даних були обрані місця установки вимірювальних приладів.

Результати вимірювань вертикальної і горизонтальної жорсткості і відповідні модулі пружності підрейкові основи наведені в таблиці 3.1 і 3.2, схема визначень переміщень рейки приведена на рис. 3.5. У кожному перетині були проведені по два навантаження з побудовою петель гістерезису. Приклад петлі гістерезису наведено на рис. 3.6 і 3.7. При вимірах вертикальної жорсткості навантаження досягли 215 кН. При вимірюванні горизонтальної жорсткості колії горизонтальне зусилля доходило до 159 кН, при цьому вертикальне навантаження було не меншим за 100 кН. Виміри проводилися в дев'яти перетинах.

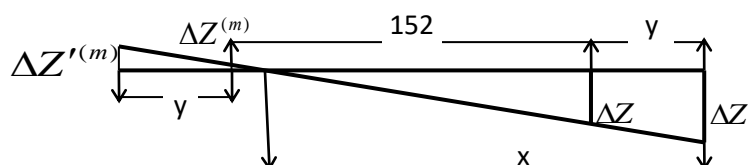


Рисунок 3.5 - Схема для визначення вертикального переміщення рейки

$\Delta Z'$  - переміщення навантаженого кінця рами;

$\Delta Z$  - переміщення рейки;

$\Delta Z'^{(m)}$  - переміщення вільного кінця рами;

$\Delta Z^{(m)}$  - переміщення завантаженого рейки;

$x$  – відстань до центру перетину;

$y$  – відстань від осі рейки до кінця рами,  $y=100$  см;

152 – відстань між осями рейок, в см.

Відстань до центру перетину визначається за формулою:

$$x = \frac{\Delta Z'(152 + 2y)}{\Delta Z' + \Delta Z'^{(m)}}$$

Переміщення рейки визначається за формулою:  $\Delta Z = \frac{\Delta Z' \cdot (x - y)}{x}$

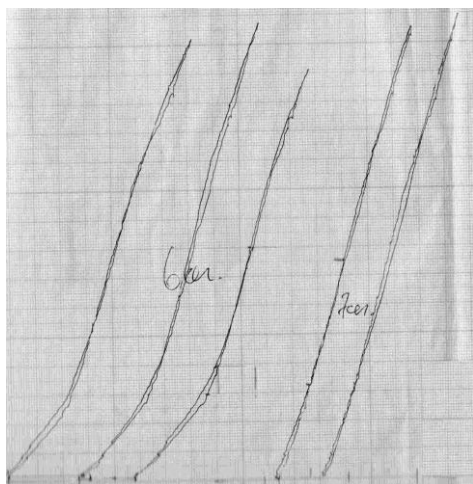


Рисунок 3.6 - Приклад петлі гістерезису при вимірюванні вертикальної жорсткості на 6, 7-м перетині ділянки - навантажений кінець рами

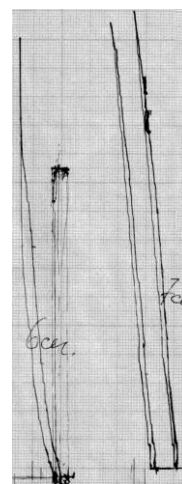


Рисунок 3.7 - Приклад петлі гістерезису при вимірюванні вертикальної жорсткості на 6, 7-м перетині ділянки-вільний кінець

Таблиця 3.1

**Визначення вертикальної жорсткості колії на дослідній ділянці**

№ перетину	Приріст сили на діаграмі, см	Реальний приріст вертикальної сили, в т	Переміщення навантаженого кінця рами на діаграмі, см	Реальні переміщення навантаженого кінця рами, см	Переміщення вільного кінця рами на діаграмі, см	Реальні переміщення вільного кінця рами, см	Переміщення рейки, см	Вертикальна жорсткість, кН/см
1	4	5.000	1	0.075	0.4	0.030	0.045	1107
2	4.2	5.250	1.4	0.105	0.2	0.015	0.071	740
3	6.1	7.625	2.5	0.188	0.4	0.030	0.126	607
4	3.6	4.500	1.4	0.105	0.5	0.038	0.065	697
5	4.6	5.750	1.3	0.098	0.3	0.023	0.063	907

Закінчення табл.3.1

№ перетину	Приріст сили на діаграмі, см	Реальний приріст вертикальної сили, в т	Переміщення навантаженого кінця рами на діаграмі, см	Реальні переміщення навантаженого кінця рами, см	Переміщення вільного кінця рами на діаграмі, см	Реальні переміщення вільного кінця рами, см	Переміщення рейки, см	Вертикальна жорсткість, кН/см
6	4.1	5.125	1.4	0.105	0.3	0.023	0.069	745
7	4.2	5.250	1.5	0.113	0.4	0.030	0.072	729
8	5.3	6.625	1.7	0.128	0.4	0.030	0.083	801
9	4.2	5.250	1.2	0.090	0.4	0.030	0.056	939

Таблиця 3.2

**Значення вертикальних модулів пружності підрейкової основи на дослідній ділянці**

№ перетину	Вертикальна жорсткість, кН/см	Вертикальний модуль пружності, $U_z$ , МПа
1	1107	71.2
2	740	41.8
3	607	31.2
4	697	38.6
5	907	54.8
6	745	42.2
7	729	41
8	801	46.5
9	939	57.4
середнє	808	47
сер. кв.		11.3

Результати вимірювань показали, що величина вертикального модуля пружності підрейковій основи нерівномірна по довжині ділянки. При середніх

значеннях 47 МПа у вертикальній площині, середньоквадратичне відхилення становить 11,3.

Аналіз вертикальних сил, що діють від екіпажу на рейки, проведено на основі обробки результатів, отриманих з використанням електронних обчислювальних машин. Після обробки результатів, отриманих в ході експерименту були отримані середні, максимальні ймовірні і максимальні сили, що спостерігалися, і деформації колії. Отримані в різних перетинах колії дані, можуть бути об'єднані в вибірки по кожній одиниці рухомого складу для кожної швидкості незалежно від номера осі. Результати угруповань значень вертикальних сил приведені в таблиці 3.3. Для наочності за результатами побудовані графіки залежності вертикальних сил від швидкості, наведені на рис. 3.8. В умовних позначеннях «М» - математичне очікування (середнє значення), «S» - середньоквадратичне відхилення, «Х<sub>мв</sub>» - максимальне можливе значення, «В» - для вагонів, «Л» - для локомотивів.

Таблиця 3.3

**Середні ( $\bar{P}$ ), максимальні ймовірні ( $P_{max}^e$ ) і максимальні спостережувані ( $P_{max}^H$ ) значення вертикальних сил (кН) на дослідній ділянці колії**

	Швидкості руху, км/г						
	5	60	100	120	130	140	155
електровози							
$\bar{P}$	109.83	109.33	108.58	105.127	109.784	105.247	101.641
$P_{max}^e$	150.014	165.987	165.786	179.013	169.827	161.134	170.763
$P_{max}^H$	145.435	176.942	200.285	191.335	209.155	206.327	226.34
вагони							
$\bar{P}$	75.555	69.623	71.6173	74.1065	74.5833	72.6342	71.782
$P_{max}^e$	108.089	113.641	113.932	124.557	118.602	115.58	122.061
$P_{max}^H$	114.421	127.501	132.848	148.985	156.859	144.228	160.207

Як видно з рис. 3.8, не спостерігається значний вплив швидкості на середні значення сил. Максимальні значення збільшуються з ростом

швидкостей, і сягають 226 кН, максимальні ймовірні - 171 кН, середні – 110 кН.

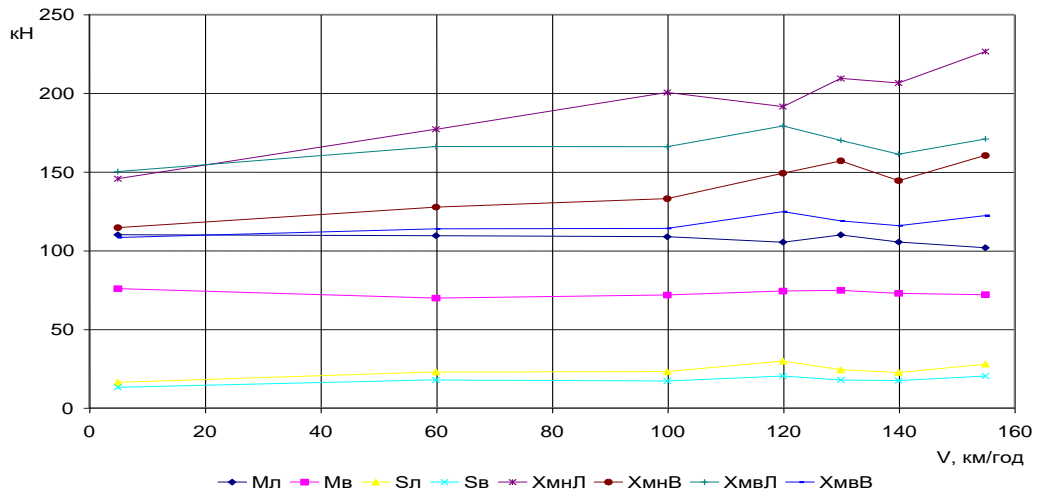


Рисунок 3.8 - Залежність вертикальних сил в рейках на дослідній ділянці від швидкості руху

Діапазон вертикальних прогинів, вимірюваними прогиномірами ПВ1...ПВ6, варіювався за середнім значенням від 1,2 мм до 1,6 мм, а за максимальними спостережуваним - від 2,1 мм до 2,7 мм. Оскільки розкид діапазону значень незначний, результати вимірювань зводилися в одну вибірку по кожній одиниці рухомого складу. Результат вибірки представлено в табл. 3.4 і на рис. 3.9.

Таблиця 3.4

**Середні ( $\bar{z}$ ), максимальні ймовірні ( $P_{\max}^6$ ) і максимальні спостережувані ( $P_{\max}^H$ ) значення вертикальних прогинів (мм) на дослідній ділянці колії**

	Швидкості руху, км/год.						
	5	60	100	120	130	140	155
електровози							
$\bar{z}$	1.4	1.5	1.3	1.6	1.6	1.6	1.5
$z_{\max}^6$	2.5	2.6	2.3	2.7	2.7	2.7	2.6
$z_{\max}^H$	2.4	2.3	2.5	2.6	2.6	2.7	2.5
вагони							
$\bar{z}$	1.2	1.3	1.2	1.4	1.4	1.4	1.3
$z_{\max}^6$	2.3	2.4	2.1	2.5	2.5	2.4	2.3

$z_{max}^H$	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	2.2
-------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

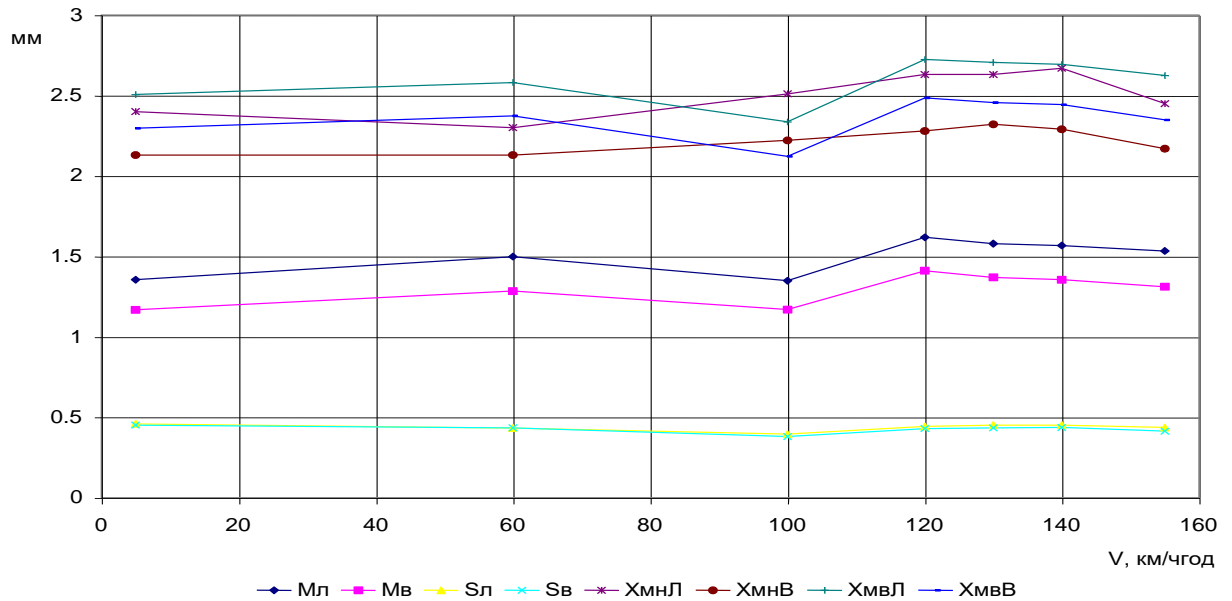


Рисунок 3.9 - Залежність вертикальних прогинів рейок від швидкості руху

Аналізуючи результати вимірювань вертикальних сил і прогинів, можна зробити наступні висновки:

- зі збільшенням швидкості, середні значення вертикальних сил, що діють на колію, практично не зростають;
- максимальні значення вертикальних сил при швидкості 155 км / год. під електровозами сягали 226 кН;
- динаміка зміни вертикальних прогинів рейок під рухомим складом практично не залежить від швидкості руху.

Динамічні напруження в підшві рейки є одним з основних показників впливу рухомого складу на колію. Нормована величина цих напружень становить 240 МПа [339] і визначає допустимі швидкості руху рухомого складу по колії з різними конструкціями верхньої будови колії, за умовами міцності рейок на вигин і кручення.

Отримані в результаті випробувань напруження в рейках були згруповані по обом рейковим ниткам для всіх перетинів. У кожній групі визначалися середні значення, максимальні ймовірні і максимальні спостережувані значення. Результати обробки отриманих результатів

наведені в табл. 3.5. За отриманими значеннями були побудовані графіки представлені на рис. 3.10.

На даній ділянці колії середнє значення напружень в залежності від швидкості руху варіювалися в діапазоні від 53 МПа до 57 МПа під локомотивами і 37 ... 40 МПа під вагонами. Максимальні спостережувані - 110 ... 163 МПа під локомотивами і 75 ... 118 МПа під вагонами.

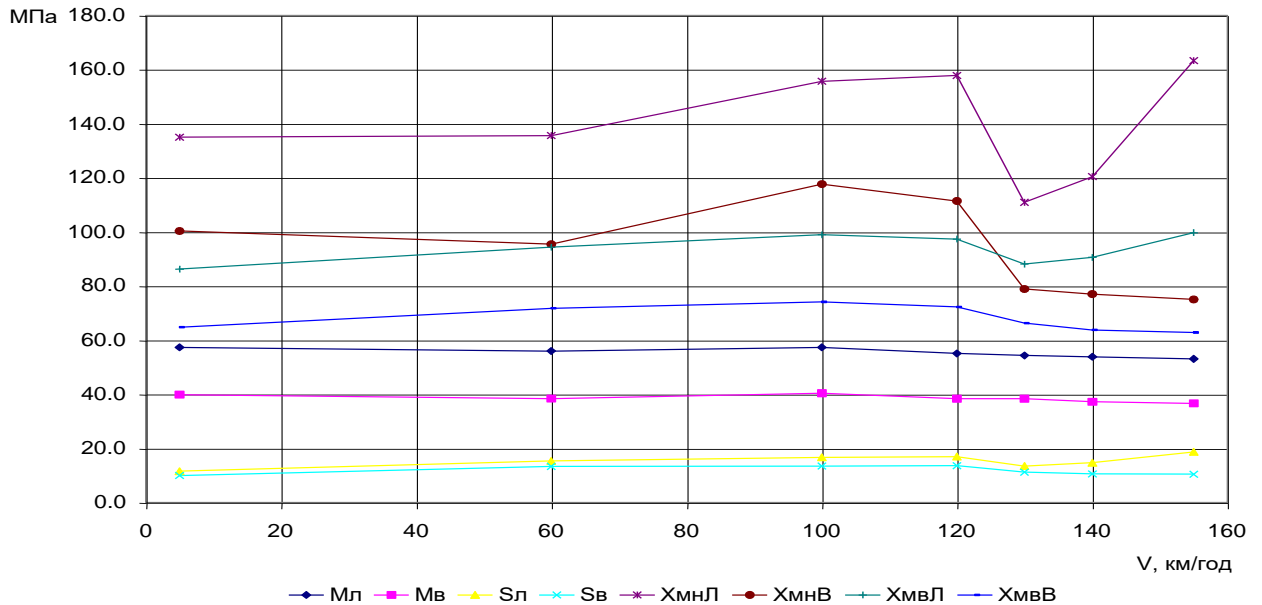


Рисунок 3.10 - Залежність напружень в кромках підшви рейок (UIC60)

Таблиця 3.5

Середні ( $\bar{\sigma}$ ), максимальні ймовірні ( $\sigma_{max}^{\beta}$ ) і максимальні спостерігаються ( $\sigma_{max}^H$ ) значення напружень в кромках підшви рейок (МПа)

	Швидкості руху, км/год.						
	5	60	100	120	130	140	155
електровози							
$\bar{\sigma}$	57.3	55.9	57.3	55.1	54.4	53.9	53.1
$\sigma_{max}^{\beta}$	86.2	94.3	99.0	97.4	88.2	90.6	99.8
$\sigma_{max}^H$	134.9	135.6	155.7	157.8	110.9	120.5	163.3
вагоны							
$\bar{\sigma}$	39.9	38.4	40.4	38.4	38.3	37.3	36.6
$\sigma_{max}^{\beta}$	64.9	71.8	74.1	72.3	66.3	63.8	62.8
$\sigma_{max}^H$	100.3	95.5	117.6	111.4	78.9	77.0	75.0

Як видно з табл. 3.5 і рис. 3.10, кромочні напруження в рейках не перевищують допустимих значень. При максимальній швидкості запас по напруженням складає не менше 30%.

### **3.3.Результати розрахунку параметрів напружено-деформованого стану колії за існуючим методом**

До існуючого методу розрахунку відноситься розрахунок по [102], за допомогою яких можна визначити значення динамічної сили, що діє на рейку, напружень в кромках підшви і голівці рейки, в підрейковому перетині напружень в шпалі баласті і на основній площадці земляного полотна.

В існуючих нормативах відсутні чіткі норми з вертикальної пружності колії. Згідно з [102], модуль пружності колії на залізобетонних шпалах зі скріпленням КПП-5 рекомендовано 69,2 МПа. Для аналізу проведено розрахунки до відповідно [102] при значеннях модуля пружності колії, що отримані в експерименті, табл. 3.2 . Результати розрахунку за існуючою методикою для чотирьох значень модуля пружності колії: середнього 47 МПа, максимального ймовірного 58,3 МПа, максимального спостережуваного 71,2 МПа, мінімального спостережуваного 31,2 МПа представлені в таблицях 3.6, 3.7, 3.8 і рис. 3.11 ... 3.16.

Таблиця 3.6

**Значення напружень в кромках підшви рейок за  
експериментальними модулями пружності основи (МПа)**

Значення модулів пружності (МПа)	Швидкості руху, км/год.					
	60	100	120	130	140	155
	електровози					
При $U=31.2$	105.77	114.91	119.67	122.11	124.57	128.32
При $U=47$	98.96	108.21	113.05	115.52	118.02	121.83
При $U=58.3$	95.35	104.67	109.54	112.03	114.55	118.4
При $U=71.2$	92.02	101.39	106.31	108.82	111.36	115.24
	вагони					
При $U=31.2$	61.49	65.97	68.38	69.63	70.91	72.87
При $U=47$	58.18	62.63	65.05	66.30	67.58	69.56
При $U=58.3$	56.5	60.93	63.34	64.6	65.88	67.87
При $U=71.2$	54.95	59.36	61.77	63.03	64.32	66.31

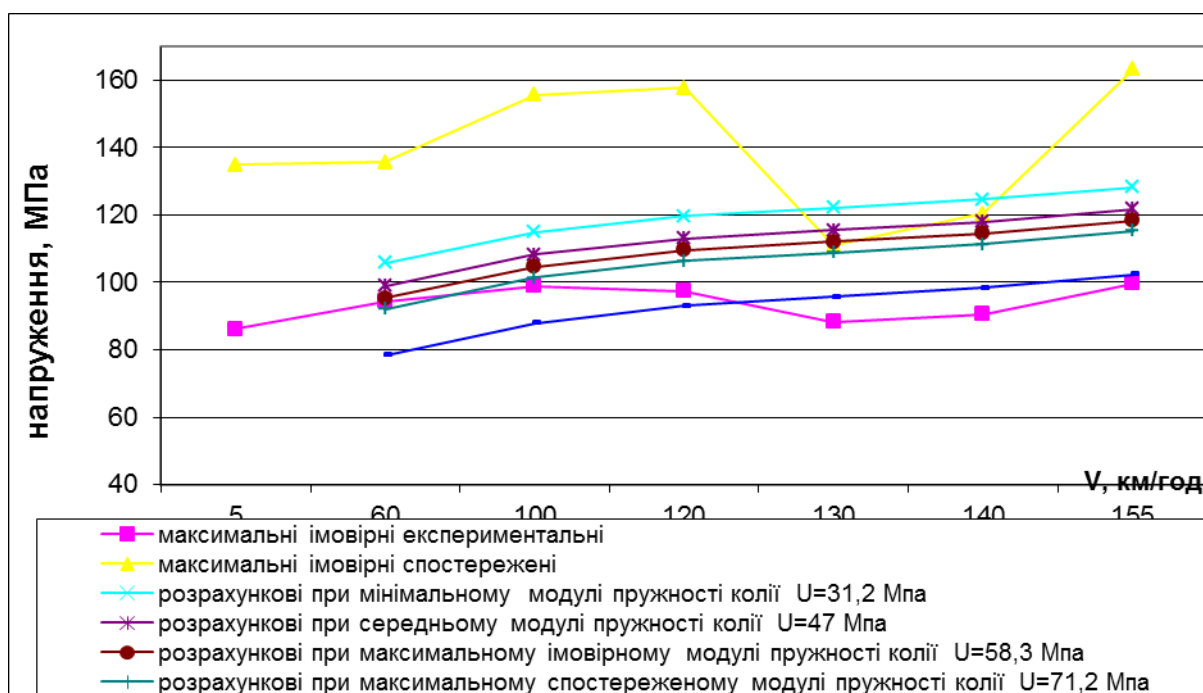


Рисунок 3.11 - Залежність напружень в кромках підшви рейок від швидкості руху локомотива

Як видно з таблиці 3.6 і рис. 3.11, 3.12, кромочні напруження в рейках, розраховані за [102] при різних модулях пружності підрейкові основи вище, ніж середні експериментальні значення. Виходячи з результатів напруження, що розраховані за методикою при значеннях  $U = 31,2$  МПа на 14% нижче для локомотивів, і на 27% нижче для вагонів ніж максимальні спостережені експериментальні значення.

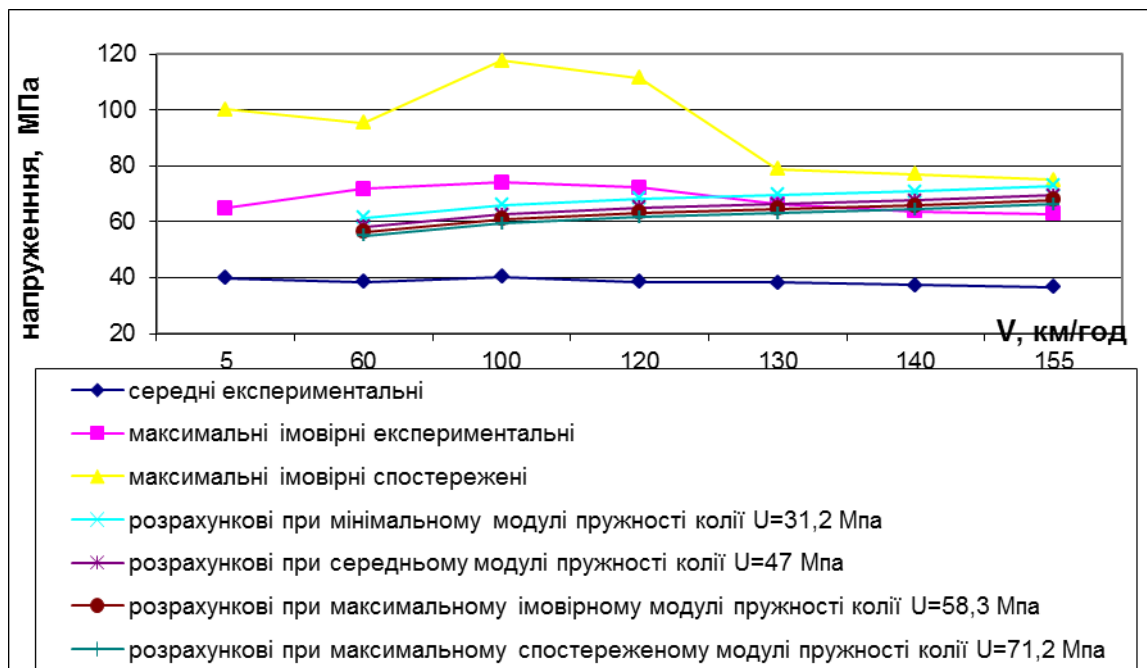


Рисунок 3.12 - Залежність напружень в кромках підшви рейок від швидкості руху вагону

Таблиця 3.7

**Значення сил в рейках, що отримані за експериментальними модулями пружності основи (кН)**

Значення модулів пружності (МПа)	Швидкості руху, км/год.					
	60	100	120	130	140	155
	електровози					
При $U=31.2$	128.3	139.4	145.2	148.1	151.1	155.7
При $U=47$	133	145.4	151.9	155.2	158.6	163.7

При $U=58.3$	135.2	148.4	155.4	158.9	162.5	167.9
При $U=71.2$	137.2	151.2	158.5	162.2	166	171.8

Закінчення табл. 3.7

Значення модулів пружності (МПа)	Швидкості руху, км/год.					
	60	100	120	130	140	155
	вагони					
При $U=31.2$	76.6	82.1	85.2	86.7	88.3	90.7
При $U=47$	80.3	86.4	89.7	91.5	93.2	96
При $U=58.3$	82.2	88.7	92.2	94.0	95.9	98.8
При $U=71.2$	84.1	90.8	94.5	96.5	98.4	101.5

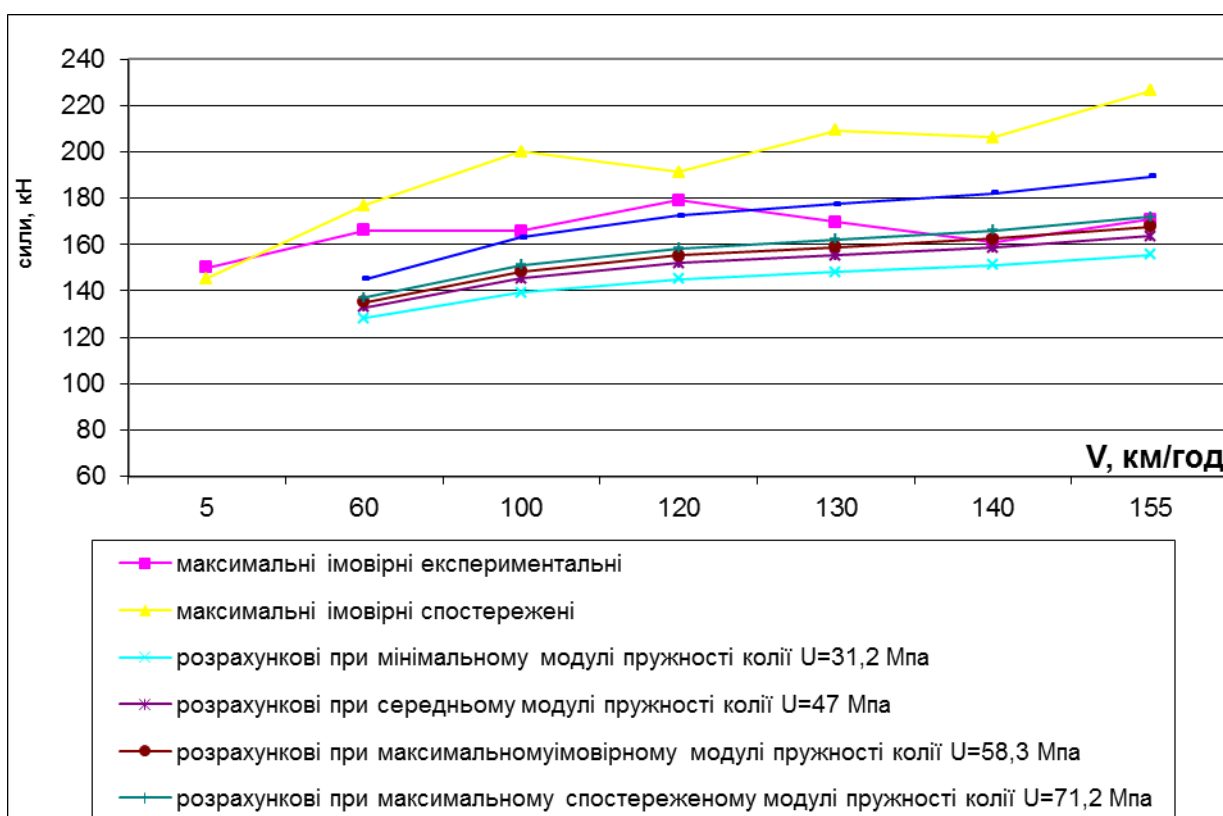


Рисунок 3.13- Залежність вертикальної сили, що виникає при русі локомотива, від його швидкості

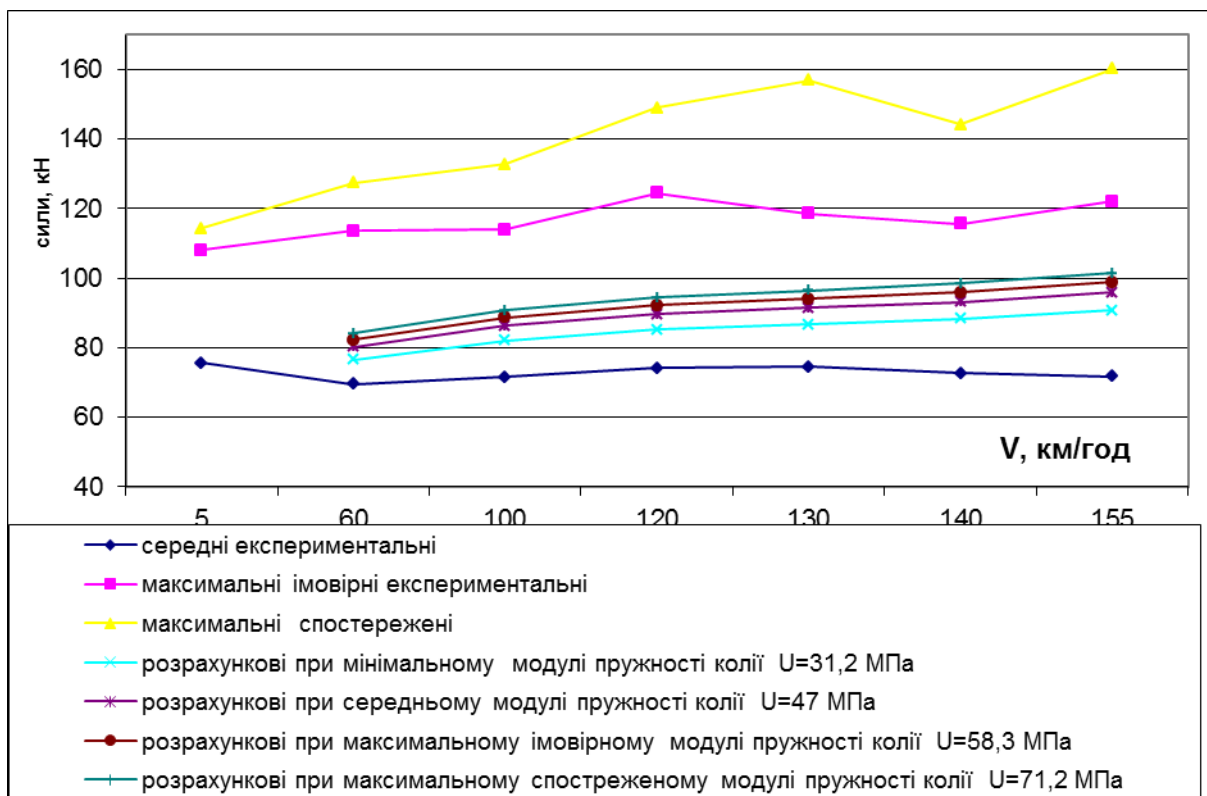


Рисунок 3.14- Залежність вертикальної сили, що виникає при русі вагону, від його швидкості

Як видно з таблиці 3.7 і рис. 3.13, 3.14, значення вертикальних сил, розрахованих за існуючою методикою для локомотивів нижче, ніж максимально спостережені на 17%, але на 57% вище ніж середні значення, відхилення від максимально можливих значень становить 13%. Розраховані за існуючою методикою для вагона значення вертикальних сил нижче як максимально спостережених, так і максимально можливих значень відповідно на 30% і 14%, але на 44% вище, ніж середні значення. Графіки вертикальних сил, розрахованих при різних значеннях модуля пружності носять однаковий характер, як при русі локомотива, так і вагона. Кращим варіантом є розрахунок при  $U = 71,2$  МПа, які мають відхилення від спостережених, ймовірних і середніх значень відповідно для локомотивів і вагонів 14%, 8%, 47%, і 18%, 20%, 21%.

Таблиця 3.8

**Значення прогинів рейок, що отримані за експериментальними модулями пружності основи (кН)**

Значення модулів пружності (МПа)	Швидкості руху, км/год.					
	60	100	120	130	140	155
	електровози					
При $U=31.2$	2.15	2.34	2.44	2.49	2.54	2.61
При $U=47$	1.61	1.77	1.85	1.89	1.93	1.99
При $U=58.3$	1.39	1.53	1.6	1.64	1.68	1.73
При $U=71.2$	1.21	1.34	1.41	1.44	1.47	1.53
	вагони					
При $U=31.2$	1.41	1.51	1.57	1.59	1.62	1.66
При $U=47$	1.04	1.11	1.15	1.18	1.2	1.26
При $U=58.3$	0.88	0.95	0.99	1.01	1.03	1.06
При $U=71.2$	0.77	0.83	0.86	0.88	0.9	0.92

Як видно з таблиці 3.8 і рис. 3.15 і 3.16 з експериментальними даними узгоджуються значення прогинів, розраховані за існуючою методикою при підстановці мінімального спостережуваного значення модуля пружності підрейкові основи, тобто при  $U = 31,2$  МПа. значення прогинів розраховані для середнього спостережуваного модуля пружності колії  $U = 47$  МПа в середньому на 18% більше, ніж середні експериментальні для локомотива і на 14% менше, ніж середні експериментальні для вагона. Прогини рейки, розраховані при  $U = 58,3$  МПа для локомотива на 5% більше, для вагона 26% менше, при  $U = 71,2$  МПа дають занижені значення, як для локомотивів, так і для вагонів.

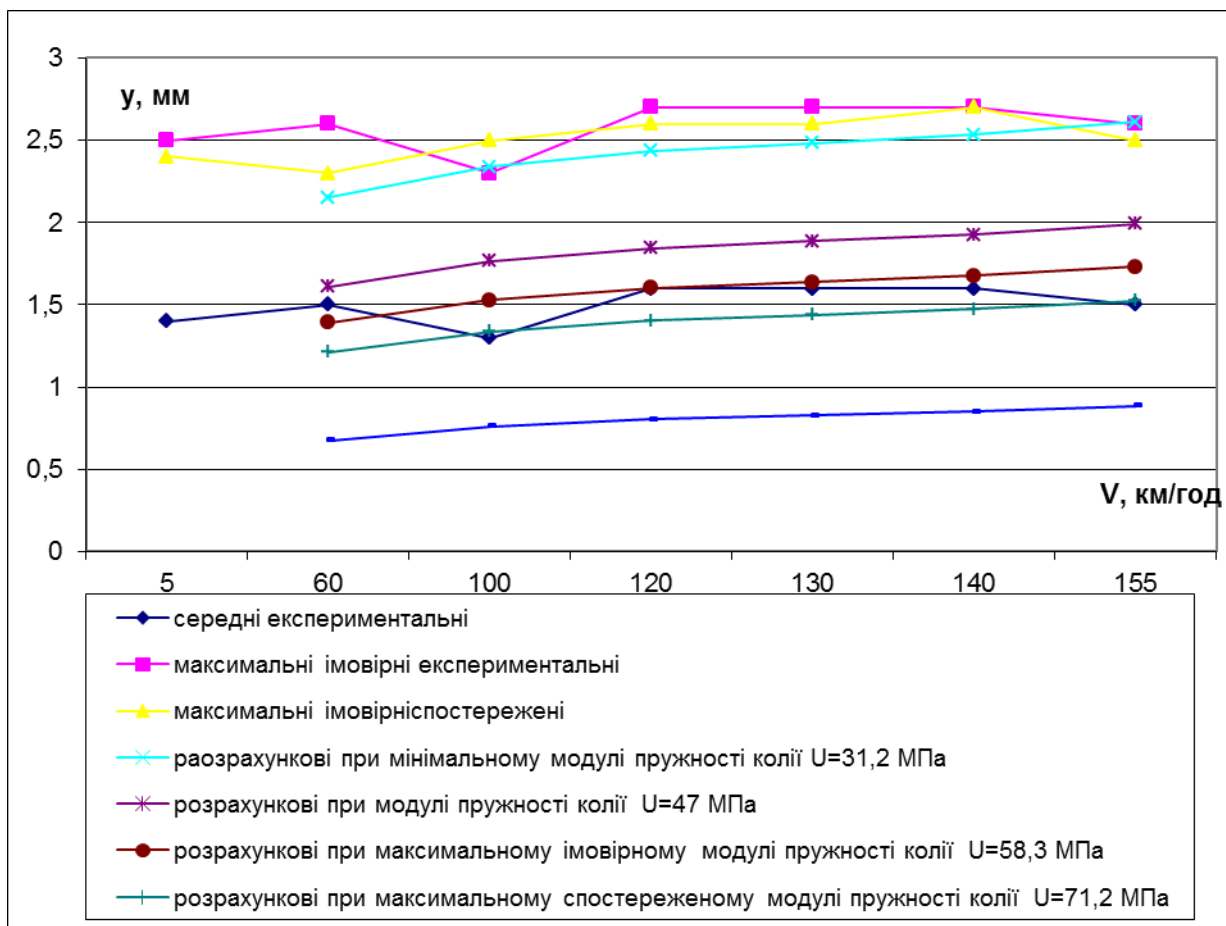


Рисунок 3.15 - Залежність прогинів рейок від швидкості руху  
ЛОКОМОТИВА

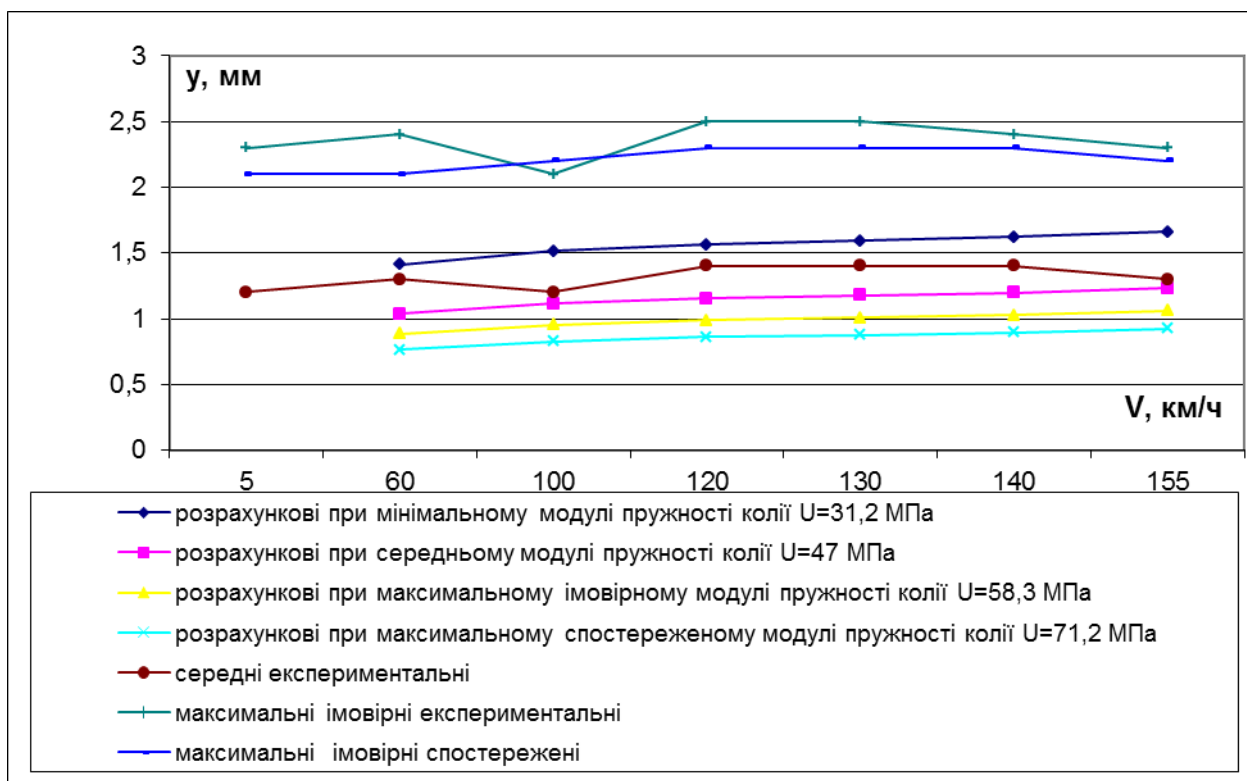


Рисунок 3.16 - Залежність прогинів рейок від швидкості руху вагона

За результатами аналізу можна зробити наступні висновки: модуль пружності колії істотно впливає на показники напружено-деформованого стану колії; існує необхідність нормування значень модуля пружності колії для контролю стану колії, оскільки його зменшення призводить до збільшення значень прогинів рейки (на 70%) та до збільшення значень напружень в рейках (на 10 %), за якими встановлюються умови обертання рухомого складу, при більших деформаціях елементів колії, тобто, більшій деформативній роботі колії та більш важких умов експлуатації.

### **3.4. Порівняння параметрів напружено деформованого стану колії за різними моделями і експериментом**

Порівняння параметрів розрахунків проводимо за існуючою та запропонованим методом і експериментом.

Для перевірки достовірності моделі, розробленої за запропонованому методу розповсюдження імпульсу пружними хвилями виконані розрахунки за умовами, відповідними дослідній ділянці. Автором дисертаційної роботи з використанням системи автоматизованого проектування Solid Works було складено модель конструкції колії. Геометричні розміри елементів колії, які закладаються як вихідні дані для розрахунку, приймалися згідно з кресленнями представленим НКТБ ЦП УЗ.

Особливістю розрахунку при зазначених моделюваннях є закладення фізичних величин для кожного елемента, що входить в конструкцію колії. Тому для розрахунку елементів рейко-шпальної решітки використано характеристики матеріалів, з яких виготовлено ці елементи, а вихідні данні для під шпальної основи були розглянуті наведені нижче величини.

Ділянка - одноколійна, являє собою насип, ґрунтом земляного полотна є супісок. Для даного матеріалу модуль деформації  $E = 30-40$  МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi = 30-21^{\circ}$ , коефіцієнт пористості становить  $\varepsilon = 0,45-0,75$ , нормативні значення питомих зчеплень  $C = 0,15-0,03$  кг / см<sup>2</sup> [350]. Баластом служить щебінь товщиною шару під шпалою 40 см. Для цього матеріалу модуль пружної деформації  $E = 100-300$  МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi = 50-40^{\circ}$ , коефіцієнт пористості становить  $\varepsilon = 0,34-0,4$ , нормативні значення питомих зчеплень  $C \approx 0,2$  кг / см<sup>2</sup> [351]. Шпали залізобетонні, бетон, який використовували для виготовлення марки М500 [352], арматура з високоміцної сталі, характеристики рейкової сталі наведені в [353].

Значення вертикальних сил приймалися за результатами експерименту для варіанту впливу при русі зі швидкістю 155 км./год. Порівняння результатів за розрахунками за запропонованим методом та експериментом наведені в табл. 3.10. Порівняння за існуючою методикою (при  $U = 69,2$  МПа), запропонованою та експериментом наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9

### Порівняння напружень в кромках та деформацій рейок

Значення сили, кН	вагони			електровози		
	запр. метод,	експеримент	різниця, %	запр. метод,	експеримент	різниця, %
1	2	3	4	5	6	7
Напруження в кромках рейок, МПа						
71.782	35.88	36.6	1.97			
122.061	63.14	62.8	0.54			
160.207	75.43	75.0	0.57			
101.641				52.09	53.1	1.90
170.763				98.27	99.8	1.53
226.34				159.5	163.3	2.33

Закінчення табл. 3.9

1	2	3	4	5	6	7
Прогини рейок, мм						
71.782	1.51	1.3	16.1			
122.061	2.01	2.3	12.6			
160.207	2.63	2.2	19.5			
101.641				1.62	1.5	8.0
170.763				2.76	2.6	6.15
226.34				2.81	2.5	12.4

Значення експериментальних даних отримані для модуля пружності  $U = 31,2 - 71,2$  МПа. При експерименті та при обробці даних не враховано при яких співвідношеннях значень вертикальних та горизонтальних сил, тобто при якому розташуванні коліс відносно колії в поперечній площині отримані данні. Отже, з врахуванням зазначених недоліків, за результатами порівняння, наведеними в табл. 3.9, спостерігаємо достатню збіжність результатів отриманих за запропонованим методом та експериментом.

В табл. 3.10 наведено порівняння за двома методами та експериментом.

Таблиця 3.10

**Результати розрахунків колії на міцність отриманих за допомогою різних методик і експериментально**

Спосіб	Напруження (МПа) в		Прогин рейки, мм
	кромках підшви	головці рейки	
Існуючий метод [93]	115.7	120.69	1.56
Запропонований метод	159.5	145.9	2.81
Експеримент	163.3	146.1	2.5

За порівнянням параметрів напружено-деформованого стану колії, наведеними в табл. 3.9 та 3.10, встановлено, що напруження в кромках рейок, отриманих за запропонованою моделлю просторових коливань конструкції залізничної колії відрізняються від отриманих експериментально на 2,3%, та демонструє якісний збіг результатів. Різниця результатів розрахунку та експерименту за вертикальними прогинами рейок становить 19,5%, що обумовлено особливостями розташування прогиномірів, виміри яких не враховують прогини баластного шару та земляного полотна.

### **3.5. Застосування запропонованого методу визначення напружено-деформованого стану колії в експериментальних дослідженнях**

**3.5.1. Врахування фізичної сутті роботи датчиків.** Для виміру вертикальних та горизонтальних сил застосовують певні схеми наклейки та підключення датчиків і певні методики для обробки даних. Так для виміру вертикальних сил розташовують тензорезистори на шийці рейки попарно з зовнішньої та внутрішньої сторін на рівні нейтральної вісі рейки, та застосовують певну схему підключення тензорезисторів, оскільки враховують роботу рейки під впливом рухомого складу. Датчики наклеюються в певному напрямку, який буде отримувати деформації в потрібному напрямку, оскільки датчики фіксують всі деформації на наклеєній площині. Враховуючи попередній факт було наклеєні датчики для виміру деформацій аналогічно вимірам вертикальної сили, але повернуті на  $90^0$  для виміру поздовжніх деформацій. Оскільки вони розташовані на нейтральній вісі, та довжина їх бази не значна, вони повинні фіксувати деформації тільки у поздовжньому напрямку.

Для підтвердження даного факту був проведений експеримент в рамках проведення комплексних динамічних (ходових [339]) та з впливу на залізничну колію та стрілочні переводи випробувань рухомого складу, де, по-перше, були наклеєні датчики для виміру поздовжніх сил. По-друге, заміряно різницю записів даних при визначенні горизонтальних сил.

Показники, що визначались на колії записані з частотою дискретизації не менше 4000 Гц і на рухомому складі з частотою 400 Гц без застосування фільтрів. Запис на рухомому складі та колії був синхронізований с записом на колії. Вертикальну жорсткість було визначено з застосуванням методики, яка отримана на базі [20, 36, 39, 41].

Дослідний склад сформовано з двох локомотивів та п'ятнадцяти вагонів. Склад пасажирський зчленованого типу особливістю вагонів є одноосьовий візок маятникового типу, який наведено на рис. 3.17. Профіль колеса PRICAR R7. Схему розташування датчиків в прямій ділянці колії наведено на рис. В.1. Значення сил при зважуванні для кожної осі наведено в табл.В.1

Дослідна ділянка двоколійна, розташована на насипу висотою 1,5 м. Колія безстикова із залізобетонними шпалами та скріпленням системи W14 з прокладкою Zw, кутовою направляючою плитою Wfp14K та клемою Sk1 14. Товщина щебеневого баласту 80 см. Встановлена швидкість ділянки для пасажирських поїздів 120 км/год. та для вантажних - 80 км/год. Максимальна швидкість в ході випробувань склала 200 км/год. Схеми розташування датчиків на прямій ділянці колії наведено на рис. В.1 та 3.18.



Рисунок 3.17 – Візок вагону

При обробці експериментальних даних ставилась задача проаналізувати не тільки максимальні, середні, максимально імовірні та спостереженні експериментальні значення сил, а й проаналізувати характер їх зміни та співвідношення вертикальних та горизонтальних сил, що діють в одному перетині.

В табл. В.2 наведено статистичні значення, що отримані за існуючою методикою для протоколу.



Рисунок 3.18 – Розташування датчиків за перетинами.

Виміри поздовжніх сил за рахунок наклейки датчиків на нейтральну вісь рейки підтвердив фіксування датчиками всіх видів деформацій рейки в певному перетині від впливу рухомого складу. Так, при проходженні коліс над перетином виміру, датчики фіксували деформації від впливу вертикальної сили. Загальний стрибок від впливу вертикальних сил, при всіх записах незалежно від швидкості руху, мав форму трапеції. Бічні сторони мали різні кути нахилу до основ, але зберігалась постійна залежність: кути бокової сторони до основи трапеції при наїзді на перетин крутіші ніж при віддалені від нього.

Значення боковою сили вимірювались двома методами: за допомогою експериментально отриманих величин напружень розтягнення в кромках подошви рейки та у зовнішній грані головки рейки; за різницею протилежних за знаком згинальних моментів, що виникають у шийці рейки під впливом бічних сил (метод Шлюмпфа). Групу датчиків, що вимірюють за другим методом на схемі позначено (Шл). На рис. 3.19 наведено наклейку датчиків при яких датчики 1 та 2 та датчики 3 та 4 знаходились в одному перерізі, на відстані 50 мм та 100 мм.

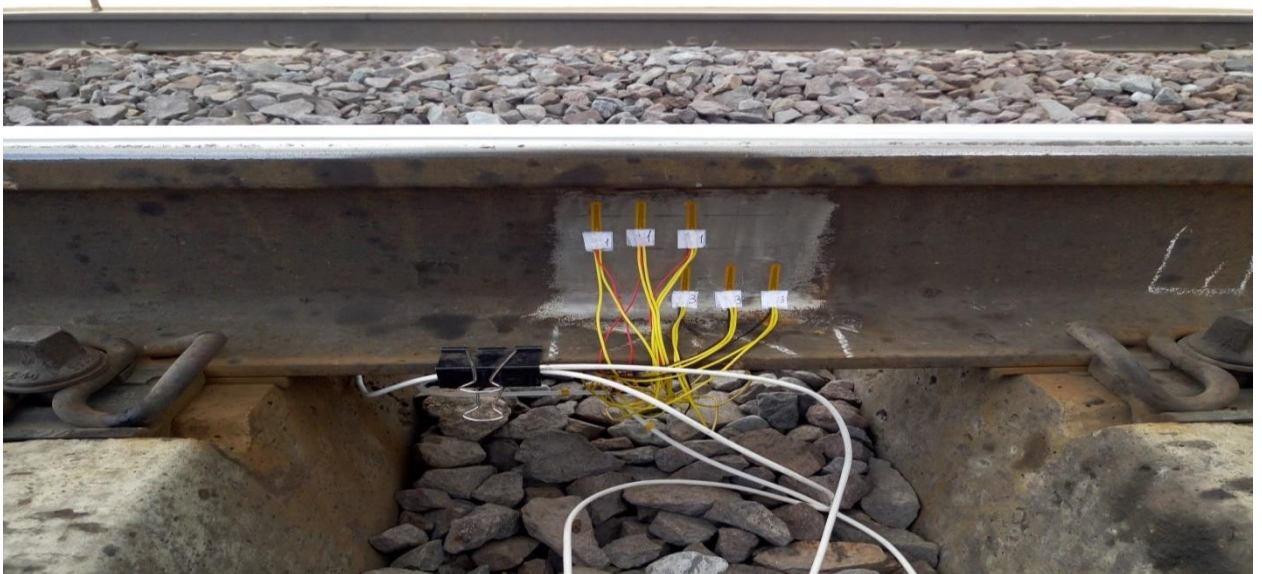


Рисунок 3.19 – Вимір бічних сил за методом Шлюмпфа для різних довжин.

Значення горизонтальної сили, що отримані за показаною на рис. 3.19 схемі, були заміряні при швидкостях руху від 80 до 200 км/год. На рис 3.20 наведено осцилограму для швидкості руху 180 км/год.

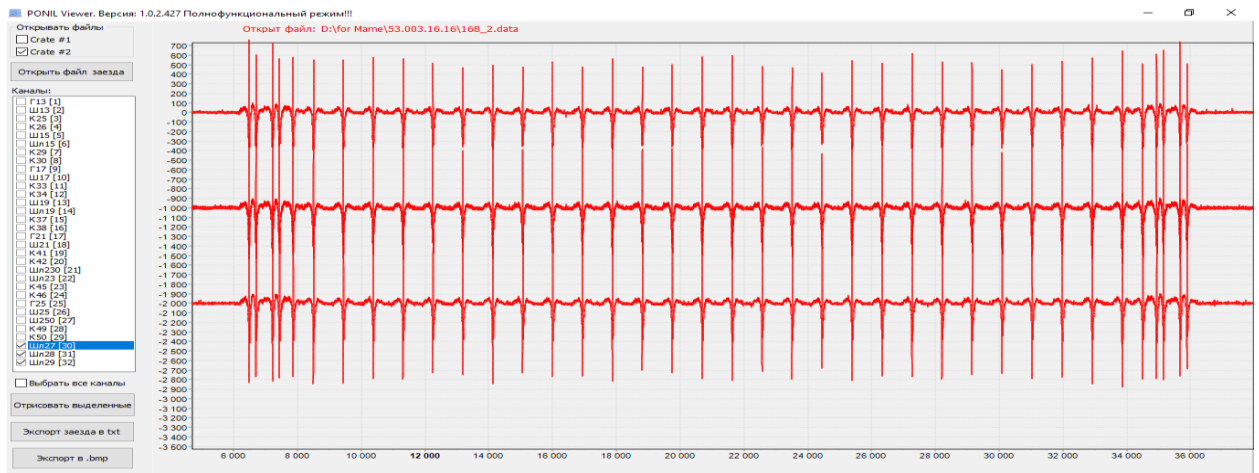


Рисунок 3.20 – Осцилограма виміру бічних сил за методом Шлюмпфа для різних довжин зміщення датчиків при швидкості руху 180 км/год.

За результатами обробки даних в табл. В.3 наведено значення вертикальних сил для одного перетину колії для швидкості руху 180 км/год., але при різних поєднаннях даних. Також значення наведено для горизонтальних сил в табл. В.4 та напружень в кромках в табл. В.5.

Аналіз результатів обробки даних за значенням сил та напружень (табл. В.3...В.5) демонструє дуже великий розкид зазначених величин. При оцінці характеристик міцності достатньо перевірити максимальні значення величин, що діють на колію та виникають в її елементах. Але при оцінці надійності роботи колії необхідно оцінити показники за характером руху поїздів. Отже необхідно розглядати не окремі величини, а співвідношення величин вертикальних та горизонтальних сил, що діють в перетинах колії, та за такими поєднаннями проводити групування даних.

За результатами експерименту значення горизонтальної сили за методом Шлюмпфу при накладці датчиків зі зміщенням на 50 мм, надавали значення адекватні значенням виміряним за першим методом ніж датчики, що знаходились в одному перетині або зі зміщенням на 100 мм. Процеси, що записувались датчиками наклеєними без зміщення дуже сильно відрізнялись

від двох інших як за знаком так і за значеннями горизонтальної сили, які були у 1,26...1,63 разів вище ніж зафіксованими датчиками при зміщенні 50 мм. Процеси записані датчиками зі зміщенням 50 мм та 100 мм схожі за характером. Датчики, що наклеєні зі зміщенням 100 мм фіксують значення сили у 1,1...2 рази нижче ніж датчики зі зміщенням 50 мм.

**3.5.2. Застосування запропонованого методу визначення напружено-деформованого стану колії при рішенні задач по розміщенню датчиків в експерименті** Бічні сили вимірюють одним з двох методів [339]:

– перший метод: за допомогою експериментально отриманих величин напружень розтягнення в кромках підошви рейки та у зовнішній грані головки рейки;

– другий метод: за різницею протилежних за знаком згинальних моментів, що виникають у шийці рейки під впливом бічних сил (метод Шлюмпфа).

За першим способом, розробленим О.П. Єршковим рейку з вертикальним та горизонтальними вигинами розглядають як балку, що лежить на суцільній пружній основі. Дію вертикальної сили  $P$ , горизонтальної сили  $H$  та крутного моменту  $M_{кр}$  пов'язано формулою:

$$M_{кр} = Hh'_1 \pm Pe, \quad (3.1)$$

де  $h'_1$  - плече сили  $H$  відносно центру кручення;

$e$  – плече сили  $P$  відносно центру вигину рейки в вертикальній площині.

За аналізом кореляційних залежностей було доказано наявність зв'язку між різницею та сумою кромочних напружень, що виникають під набігаючими колесами, та між горизонтальною і вертикальною складовими фактичного тиску направляючого колеса на рейку і встановлено значення коефіцієнтів

( $A_1, A_2, A_3$ ), що розраховуються в залежності від фактичного місця розміщення кожного з датчиків. Значення сили визначають:

$$H = 4 \cdot W_z^n \cdot k_y^T \cdot (A_1 \cdot \sigma_{нар}^n + A_2 \cdot \sigma_{вн}^n + A_3 \cdot \sigma_{нар}^2), \quad (3.2)$$

де  $W_z^n$  – горизонтальний момент опору рейок щодо крайніх волокон підшви (см<sup>3</sup>);

$k_y^T$  – коефіцієнт відносної жорсткості рейки і підрейкової основи з урахуванням тертя в горизонтальній площині,

$\sigma_{нар}^n$ ,  $\sigma_{вн}^n$ ,  $\sigma_{нар}^2$  – експериментальні напруження в зовнішній і внутрішній кромках підшви рейки та зовнішній грані головки рейки, (МПа).

За другим методом вимір горизонтальної сили проводять за допомогою мосту Уитстона. У вимірювальному перерізі рейки тензорезистори 1-4 (рис. 3.20) розташовують на шийці рейки попарно з зовнішньої та внутрішньої сторін. Поздовжні осі тензорезисторів розташовують над нейтральною віссю поперечного перерізу рейки (тензорезистори 1 і 2) і під нейтральною віссю (тензорезистори 3 і 4) у перерізах з однаковою товщиною шийки.

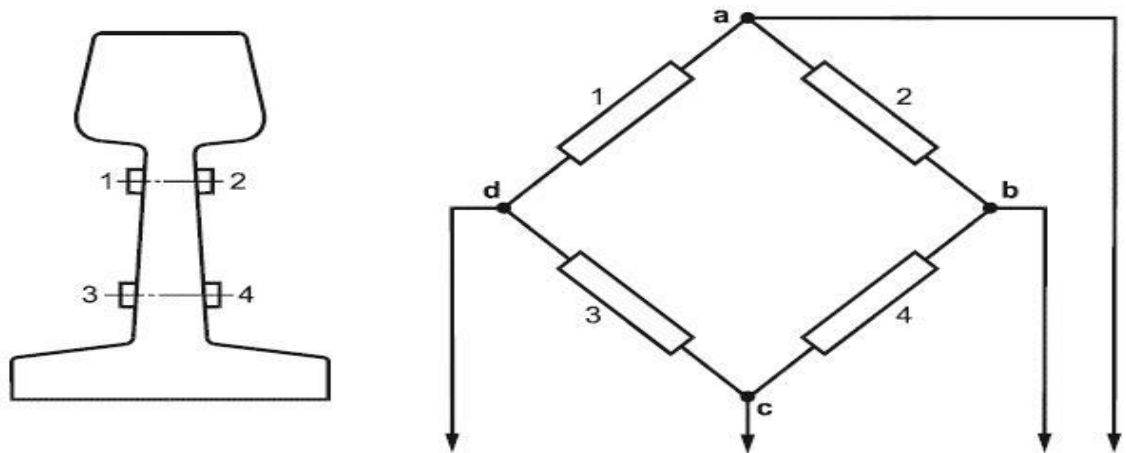


Рисунок 3.20 – Схема розміщення та підключення тензорезисторів для вимірювання бічних сил методом Шлюмпфа.

Точки  $a$  і  $c$  – вимірювальна діагональ;  $d, b$  – живлення мосту

Бічні сили  $H$ , кН, які визначають за методом Шлюмпфа, обчислюють за формулою:

$$H = \frac{M_{1-2} - M_{3-4}}{a}, \quad (3.3)$$

де  $M_{1-2}$ ,  $M_{3-4}$  – згинальні моменти в шийці рейки в перерізах 1-2 та 3-4;

$a$  – відстань між перерізами 1-2 та 3-4, см.

Якщо розписати залежність (3.3), тоді:

$$M_{1-2} - M_{3-4} = 2H(h_1 - h_2), \quad (3.3)$$

де  $h_1$ ,  $h_2$  - плечі сили  $H$  до перерізів 1-2 та 3-4 відповідно.

Отже, особливістю вимірювання є таке розташування датчиків, при якому відсутні дії вертикальних сил. Для вимірів на колії з дерев'яними шпалами за експериментом встановлено, що розташування датчиків 1-2 повинні бути зміщені відносно датчиків 3-4 на 10 см.

За своєю фізичною сутністю міст Уитстона вимірює вихідну напругу мосту:

$$\Delta U = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U, \quad (3.3)$$

де  $R_1, R_2, R_3, R_4$  - опір тензорезисторів;

$U$  – джерело живлення.

У відповідності (3.3) зміна вихідної напруги, викликана змінами опорів:

$$\Delta U = \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1 - \eta) U, \quad (3.4)$$

де  $\eta$  - погрішність мосту.

$$\eta = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + 2}, \quad (3.5)$$

$\frac{\Delta R_i}{R_i} = k\varepsilon_i$  - співвідношення між опором тензоризисторів через діючих на них деформації.

Остаточно вихідна напруга становить:

$$\Delta U = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)(1 - \eta)U. \quad (3.6)$$

Отже, для отримання значень горизонтальної сили необхідно, щоб компенсувались деформації від вертикальних та крутних сил.

Тиск від впливу рухомого складу передається за сферичними поздовжніми та поперечними хвилями та визначається як:

$$p = \rho u \omega A. \quad (3.7)$$

де  $\rho$  - щільність середовища;

$\omega$  - частота передачі імпульсу;

$u$  – швидкість розповсюдження хвилі за напрямком;

$A$  – амплітуда коливання.

Залежність між значеннями тиску в різних точках та напрямках прямо пропорційна відстані розташування певної точки від центру хвилі:

$$p_i = \frac{p}{R_i}. \quad (3.8)$$

Енергетична характеристика хвиль – інтенсивність хвилі складає:

$$I = \frac{p^2}{2\rho u} = \frac{p^2}{2Z}, \quad (3.9)$$

де  $Z$  - імпеданс середовища.

Отже для оцінки розташування датчиків для вимірів горизонтальної сили достатньо оцінити зміну значень тиску та інтенсивності хвилі.

Стосовно розташування датчиків, вони можуть або знаходитись в одному перетині, або в різних.

Якщо 1-2 знаходяться в одному з датчиками 3-4 перетині, то відповідно дії сил в перетині на них через контактну площу чинять вплив: повне динамічне вертикальне навантаження, момент, як наслідок прикладання дії динамічної сили до шийки вісі та горизонтальне навантаження від впливу рамної сили. Отже, тензоризистори будуть деформуватись в наслідок стискання, вигину та крученню. Причому, якщо помістити вісі по осі симетрії рейки, та вважати позитивним напрямком у сторону внутрішньої частини рейки, а від'ємний – зовнішньої частини, тоді відносно розташування середини контакту від вісі рейки на різних відстанях будуть різні співвідношення між сприйняттям деформацій датчиками. Так, якщо середина площі контакту для рейок:

1) від внутрішньої бокової грані головки рейки до датчиків 1, 2 вертикальні деформації, що діятимуть як складові горизонтальних навантажень, будуть компенсуватись деформаціями від поперечних з вертикальною поляризацією та поздовжніх хвиль. Деформації кручення будуть сприйматися всіма датчиками. Залежність між амплітудами  $A_2 < A_1 < A_4 < A_3$ ;

2) від датчиків 1, 2 до - 3, 4 вертикальні деформації, що діятимуть як складові горизонтальних навантажень, будуть компенсуватись деформаціями від поперечних з вертикальною поляризацією та поздовжніх хвиль в датчиках 1, 3 та посилюватись в датчиках 2, 4. Сили кручення будуть сприйматися всіма датчиками. Залежність між амплітудами до нуля  $A_2 \leq A_1 < A_4 \leq A_3$  при переході до від'ємних значень розташування середини контактної площадки відносно всі рейки  $A_1 \leq A_2 < A_3 \leq A_4$ ;

3) за датчиками 3, 4 вертикальні деформації сприймаються всіма датчиками та сили кручення будуть компенсуватись деформаціями від горизонтальних навантажень. Залежність між амплітудами  $A_1 < A_2 < A_3 < A_4$ .

Якщо датчики знаходитимуться в різних перетинах, тоді зміняться значення тиску та інтенсивності хвиль за рахунок зміни імпедансу:

$$\begin{aligned} Z_t &= \frac{c_t \rho}{\cos(\Theta_t)} \cos^2(2\Theta_t), \\ Z_r &= \frac{c_t \rho}{\cos(\Theta_t)} \sin^2(2\Theta_t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

де  $\Theta_t, \Theta_r$  – кути між напрямками відповідних хвиль та нормаллю до поверхні.

Отже, за результатами аналізу метод Шлюмпфа адекватно визначає горизонтальну силу взаємодії рейок та коліс при: відсутності горизонтальних зносів рейок та наявності вертикального зносу до 2 мм та нових коліс рухомого складу. В будь-якому випадку, датчики 1, 2 необхідно розміщати з датчиками 3, 4 в різних перерізах. Відстань між датчиками 1-3 та 2-4 визначається співвідношенням кутів між напрямків відповідних хвиль та нормаллю до поверхні. Для колії на залізобетонних шпалах зміщення датчиків повинно бути меншим, ніж для колії на дерев'яних шпалах, оскільки при розповсюдженні впливу рухомого складу на колію відбиті коливання більші для колії на залізобетонних шпалах на 11%, кути заломлення для поздовжніх хвиль менші на 4%, значення кутів заломлення для поперечних хвиль більші у 4,2 рази, швидкість передачі коливань за глибиною менші у 2,9...3,8 разів. При сприйнятті навантажень від рухомого складу робота прокладок та залізобетонних шпал сприяє перерозподілу навантажень за довжиною колії на відміну від роботи колії на дерев'яних шпалах, де більшу частину сприймає підрейкова основа. Отже, вивчення процесу передачі силової хвилі від впливу рухомого складу, за запропонованим методом отримання напружено-деформованого стану колії, допоможе вирішувати задачі з розміщення датчиків при проведенні експериментів.

### 3.6.Висновки

На підставі вище наведених в даному розділі результатів отриманих за допомогою розрахунку за запропонованим та експериментальним методами, можна зробити наступні висновки:

1. Порівняння результатів отриманих за допомогою моделювання з експериментальними даними підтверджує достовірність результатів отриманих за запропонованим методом і якість моделі. Так, встановлено, що напруження в кромках рейок, отриманих за запропонованою моделлю просторових коливань конструкції залізничної колії відрізняються від отриманих експериментально на 2,3%, та демонструє якісний збіг результатів. Різниця результатів розрахунку та експерименту за вертикальними прогинами рейок становить 19,5%, що обумовлено особливостями розташування прогиномірів, виміри яких не враховують прогини баластного шару та земляного полотна.

2. Пояснено фізичну природу розкиду величин, що фіксуються датчиками при експерименті. Підтверджено можливість використання методу розповсюдження імпульсу пружними хвилями при вирішенні задач по визначенню деформативного стану колії. Показано можливість використання методу розповсюдження імпульсу пружними хвилями при вирішенні задач розміщення датчиків.

3. Аналіз обробки експериментальних даних показав необхідність групування даних за співвідношеннями величин вертикальних та горизонтальних сил.

Основні наукові результату розділу опубліковані в працях [20, 36, 39, 41].

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛІСНОЇ ПАРИ НА ПРОЦЕС ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ КОЛІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

#### **4.1. Фактори взаємодії, що впливають на надійну та функціонально безпечну роботу магістральної та промислової колій**

При впливі рухомого складу на колію в кожному її елементі виникають сили інерції, які направлені протилежно їх прискоренню, та в сукупності характеризують реакцію системи верхньої та нижньої будов колії на вплив рухомого складу. В існуючих моделях зазвичай розглядають приведену масу колії, що характеризує її інерційність. У зв'язку з цим в більшості моделей описують два крайніх випадки: перший – рух вздовж колії постійної сили з постійною швидкістю, що дозволяє вивчати наслідки геометричних нерівностей колії. Другий – вплив на колію нерухомої змінної за часом сили, що дозволяє вивчати наслідки силових впливів. У запропонованій моделі ці випадки пов'язані, оскільки параметри імпульсів поєднують геометричні та силові дані, що дозволяє вивчити вплив кожного елементу конструкції залізничної колії на її загальну реакцію від впливу рухомого складу.

При русі рухомого складу вздовж колії колісні пари не мають стійкого положення в поперечному перетині колії. Для зміни напрямку руху рухомого складу використовується властивість колісних пар міняти рух направляючим зусиллям. Воно формується на осі обертання колісної пари дотичними напруженнями в точках контакту за рахунок різниці в радіусах дисків кочення та гребенів коліс. Направляюче зусилля прикладене до диска кочення з великим діаметром і відповідає за напрямок руху колісної пари. При русі колесо, що знаходиться в контакті з рейкою на більшому діаметрі,

рухаючись з більшою швидкістю, обганяє сусіднє колесо, викликаючи розворот колісної пари. За рахунок зазору між рейковою колією і гребенями колісної пари, в залежності від її положення щодо осі колії, величина різниці в радіусах дисків кочення змінює своє значення. Тож при подальшому русі колісна пара перекочується в таке становище, коли сусіднє колесо перекочується на більший діаметр. При цьому колісна пара розгортається у зворотному напрямку. Такі дії відбуваються до вирівнювання напрямку руху колісної пари відповідно до кривизни колії.

Навіть в ідеальній прямій ділянці колії колісна пара рухається по синусоїді довжина хвилі якої залежить від конусності та радіусу колеса і ширини колії. Хвилястий рух викликає сили інерції, що створюють додатковий поперечний вплив на головку рейки. Максимальна амплітуда поперечного коливання колісної пари в прямій ділянці складає половину сумарного зазору між головками рейок та робочими поверхнями гребенів.

В кривій ділянці колії рух залишається хвилястим, але має відмінності в залежності від радіусу кривої. Пологими кривими вважаються криві, у яких радіус кривої більше за радіус кривизни траєкторії поодинокі колісної пари при її максимальному відхиленні від осі колії. При русі колісної пари в пологій кривій центр колісної пари зміщено від центра пологої кривої до зовнішньої рейки на величину відношення радіусу кривизни траєкторії до радіусу цієї кривої. Максимальна амплітуда поперечного коливання в пологій кривій буде менша, ніж в прямій ділянці на зазначене зміщення.

Якщо положення в рейкової колії дозволяє колісній парі зайняти круги кочення з різницею в радіусах, необхідної для руху в кривій, то виконується одноточковий контакт колеса з рейкою. При такому русі відсутнє кругове ковзання колісної пари по рейці, отже на зазначених ділянках спостерігають вертикальний знос рейок. За експериментальними даними [354] до таких ділянок належать прямі та криві з радіусом понад 700 м. Ресурсні показники внутрішніх рейок також обмежуються вертикальним зносом.

При недостатності різниці радіусів кругів кочення для вписування в криву колесо, що знаходиться в контакті з рейкою на більшому діаметрі, розгортає колісну пару. При цьому відбувається набігання гребеня іншого колеса на бокову грань рейки. У даному випадку утворюється двоточковий або конформний контакти колеса з рейкою. Колесо контактує з рейкою в двох точках або по викружці рейки - по вертикалі в площині катання рейки з кругом кочення і по горизонталі в площині заокруглення бокової грані рейки з гребенем колеса. При такому русі є ковзання колісної пари по рейці. Причинами такого ковзання служать як кругове ковзання гребеня по боковій грані головки рейки так і поздовжнє ковзання коліс, що викликане їх жорсткою насадкою на вісь, по рейках.

При достатньо великій різниці в радіусах катання коліс колісна пара буде притискатись до однієї з рейок як на кривих, так і на прямих ділянках колії. Внаслідок цього на одному колесі буде інтенсивно зношуватись гребень, а на іншому утворюються прокат неправильної форми. А на рейках спостерігають боковий знос, інтенсивність якого залежить від радіусу кривої. Так за даними [354], в кривих з радіусами 700-500 м ресурсні показники зовнішніх рейок обмежуються приведеним зносом, а для кривих з меншими радіусами боковим.

Вертикальний знос рейок залежить від пропущеного тоннажу, а на горизонтальний знос окрім пропущеного тоннажу впливають параметри контакту рейки з колесом. Так за [354], на стадії «приробітку» поверхня контакту мінімальна та викликає інтенсивний боковий знос до 5-7 мм головки рейки (доля таких контактів складає 20-30%, а доля контактів нових коліс з новими рейками - 5-10%), на стадії «нормальної експлуатації» знос повільно збільшується до 10 мм (доля таких контактів складає 60-75%), та починає формуватись полка на боковій грані рейки. При боковому зносі понад 16 мм можна спостерігати кочення по полці набігаючого колеса візка як без так і з відривом ободу від поверхні кочення рейки.

Стосовно можливості сходу колісної пари з рейок можливі три варіанти руху: безпечний, небезпечний і вкрай небезпечний. Ступінь небезпеки сходу колеса з рейки можна характеризувати величиною відстані від краю викружки на поверхні кочення рейки до краю поверхні кочення бандажа, що має уклон  $1/7$ . Безпечним є рух колеса, коли бандаж опирається на головку рейки тією частиною, що має уклон  $1/20$ . Якщо колесо опирається на рейку частиною бандажа з уклоном  $1/7$  рух є небезпечним, бо при цьому зростають горизонтальні поперечні сили взаємодії колеса і рейки та відповідні деформації. Рух є вкрай небезпечним при опиранні початком фаски бандажа так як при такому контакті відбувається сход рухомого складу.

Зазначені види опирання колісної пари на рейки при різних силових та геометричних факторах можуть призвести до сходу рухомого складу з колії. Так мають місце три види сходу. Перший це схід через розпір колії – віджим гребенем одного колеса головки рейки за рахунок його пружного нахилу та провалу другого колеса в середину колії з другої рейки. Другий – сход через вижимання екіпажу, вкатування гребеня колеса на головку рейки з подальшим провалом другого колеса колісної пари в середину колії. Третій – схід через здвиг рейко-шпальної решітки в горизонтально-поперечному напрямку або візком екіпажу при гальмуванні або внаслідок температурного викиду колії та наїзді локомотивом на цей здвиг.

Отже основними факторами, що впливають на реакцію конструкції колії від впливу колісної пари є: положення колісної пари в колії, що формує місце контакту взаємодії; стан рейок і коліс, що формує вид контакту взаємодії; місце та вид контакту взаємодії формують вектор сил впливу, що викликають прискорення, отже формують сили інерції, які вносять зміни до процесу деформативності.

## 4.2. Вплив стану рейок і коліс на параметри контакту їх взаємодії

Колісна пара при русі по колії з шириною  $S$  здійснює хвилястий рух, довжина якого:

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{Sr_c}{2n}}, \quad (4.1)$$

де  $n$  - конічність ободу колеса;

$S$  - ширина колії;

$r_c$  - середній круг кочення колеса,  $r_c = \frac{r_n + r_l}{2}$ ,

$r_n, r_l$  - радіуси кочення відповідно правого та лівого коліс.

Центр колісної пари рухається в прямій ділянці колії по синусоїдальній траєкторії, та контакт рейки з колісною парою вздовж рейки розташований на відрізку  $\left[-\frac{S-g}{2}, \frac{S-g}{2}\right]$  відносно центрального положення колісної пари в прямій. Де  $g$  - ширина колісної пари рухомого складу,  $y_0 = \frac{S-g}{2} = \frac{\delta}{2}$  - максимальна амплітуда відхилення.

Центр колісної пари рухається в кривій ділянці колії по синусоїдальній траєкторії відносно кінематичної осі кривої, що зміщена від осі кривої до зовнішньої рейки на величину  $y_R = \frac{Sr_c}{2Rn}$ , та контакт рейки з колісною парою вздовж рейки розташований на відрізку  $\left[-\frac{S-g}{2} + \frac{Sr_c}{2Rn}, \frac{S-g}{2} - \frac{Sr_c}{2Rn}\right]$  кінематичної осі [355]. Де  $R$  - радіус кривої ділянки.

За амплітудою коливання можна встановити при яких співвідношеннях  $S$  та  $g$  колесо обертається частиною бандажа з уклоном 1/20 або частиною бандажа з уклоном 1/7.

Ширина полоси, на яку праве колесо проектується на головку правої рейки, коли ліве колесо притиснуте до лівої рейки становить:

$$\Delta = a_n + h_n + T + \mu - S, \quad (4.2)$$

де  $a_n$  - ширини правого колеса;

$h_n$  - товщина гребеня правого колеса;

$T$  - насадка коліс;

$\mu$  - потовщення ширини гребеня правого колеса.

Ширина полоси при якій колесо обертається частиною бандажа з уклоном 1/20 становить:

$$\Delta_{1/20} = \Delta - l_{1/7} - l_\phi - l_{\text{вукр}}, \quad (4.3)$$

де  $l_{1/7}$  - ширини правого колеса при якій колесо обертається частиною бандажа з уклоном 1/7,  $l_{1/7} = 24$  мм;

$l_\phi$  - ширина фаски правого колеса  $l_\phi = 6$  мм;

$l_{\text{вукр}}$  - ширина викружки нової рейки  $l_{\text{вукр}} = 12$  мм.

Для колісних пар вагонів з урахуванням табл. 2.3 та без врахування віджимів зовнішньої і внутрішньої рейкової нитки зазначені величини становлять: при справному стані  $\Delta = 57...91$  мм та  $\Delta_{1/20} = 15...49$  мм, при несправному – при звуженні  $\Delta = 69...92$  мм,  $\Delta_{1/20} = 15...50$  мм та при розширенні  $\Delta = 56...79$  мм,  $\Delta_{1/20} = 14...37$  мм, при частково працездатному - при звуженні  $\Delta = 74...97$  мм та  $\Delta_{1/20} = 32...55$  мм та при розширенні -  $\Delta = 37...66$  мм,  $\Delta_{1/20} = -5...24$  мм. Отже при ширині колії 1510...1511 мм ребро пересічення поверхнею колеса з ухілами 1/20 та 1/7 знаходиться на відстані 30,5 (24,6)...7,5 мм лівіше за вертикальну вісь рейки. При ширині колії 1512...1515 мм ребро пересічення поверхнею колеса з ухілами 1/20 та 1/7 знаходиться на відстані мм 28,5 (24,6)...3,5 мм лівіше за вертикальну вісь рейки. При ширині колії 1516...1520 мм ребро пересічення поверхнею колеса з ухілами 1/20 та 1/7 знаходиться на відстані мм від 24,5 мм лівіше до 1,6 мм правіше за вертикальну вісь рейки. При ширині колії 1520...1528 мм, ребро пересічення поверхонь колеса з ухілами 1/20 та 1/7 знаходиться на відстані

мм від 20,5 мм лівіше до 9,6 мм правіше за вертикальну вісь рейки. При ширині колії 1529...1540 мм ребро пересічення поверхнею колеса з ухілами  $1/20$  та  $1/7$  знаходиться на відстані від 5,5 мм лівіше до 21,6 мм правіше за вертикальну вісь рейки. При ширині колії 1541...1543 мм ребро пересічення поверхнею колеса з ухілами  $1/20$  та  $1/7$  знаходиться на відстані від 0,6 мм до 24,6 мм (до початку закруглення головки рейки з радіусом 15 мм) правіше за вертикальну вісь рейки. При ширині колії 1543...1548 мм ребро пересічення поверхнею колеса з ухілами  $1/20$  та  $1/7$  знаходиться на відстані від 2,6 мм до 24,6 мм (до початку закруглення головки рейки з радіусом 15 мм) правіше за вертикальну вісь рейки та далі колесо обертається по рейці поверхнею з ухилом  $1/7$ .

Зазвичай при аналізі контакту рейки з колесом рейку розглядають або як нову, або з боковим зносом 3,5 мм, при якому рейку вважають мало зношеною, та боковим зносом 7,8 мм, при якому рейку вважають середньо зношеною. Величини зносів, при яких рейки далі вважаються дефектними: для I, II та III категорії колій при яких швидкість більше за 120 км./год. становить 7 мм; для всіх категорій при вантажонапруженості  $V > 10$  млн.т.км.брутто/км. на рік – 15 мм; для всіх категорій при вантажонапруженості  $V \leq 10$  млн.т.км.брутто/км. на рік – 18 мм. За [334] нові рейки, що покладені в I, II, III та IV (при  $V > 30$  млн.т.км.брутто/км. на рік) категорії колії вилучаються зі боковими зносами 7 та 15 і приведеними зносами відповідно 9 та 12. Та укладаються у IV (при  $V \leq 30$  млн.т.км.брутто/км. на рік), V, VI та VII категорії колії, де вони експлуатуються при зміні величини бокового зносу з 7 мм до 15 мм або до 18 мм в залежності від вантажонапруженості й максимальної встановленої швидкості руху поїздів. При цьому ці старопридатні рейки вже мають вертикальний знос відповідно 5,5, 4,5 та 7 мм. На рис. 4.1 наведено форми головок рейок при зазначених умовах. Переукладання рейок застосовується і при зміні кантів рейок в кривих ділянках колії. Але за період експлуатації рейки не мають максимальні величини зносів за двома видами. Так для

прямих ділянок та для внутрішніх рейок в кривих ділянках знос обмежується вертикальним значенням, в той час горизонтальний знос коливається в межах 3,5-7 мм. Для ділянок з радіусами 651-1000 м рекомендовано проводити один раз суцільну заміну рейок, з радіусами 351-650 м – два рази, з радіусами 350 м та менше – три рази.

Для всіх ділянок колії максимальні значення вертикального зносу прямо пропорційні пропущеному тоннажу та відповідно становлять при  $120 < V < 140$  км/год./  $V > 10$  млн.т.км.брутто/км. на рік та  $V \leq 120$  км/год./  $V < 10$  млн.т.км.брутто/км. на рік: для ділянок з радіусами 651-1000 м - 2,8/2,3/3,5 мм, з радіусами 351-650 м – 1,8/1,5/2,3 мм, з радіусами 350 м та менше – 1,4/1,2/1,8 мм. Всі рейки належать до першої групи придатності, де вертикальний знос має бути не більше 4 мм, отже можуть бути застосовані як в прямих так і в кривих ділянках колії з заміною та без заміни канту.

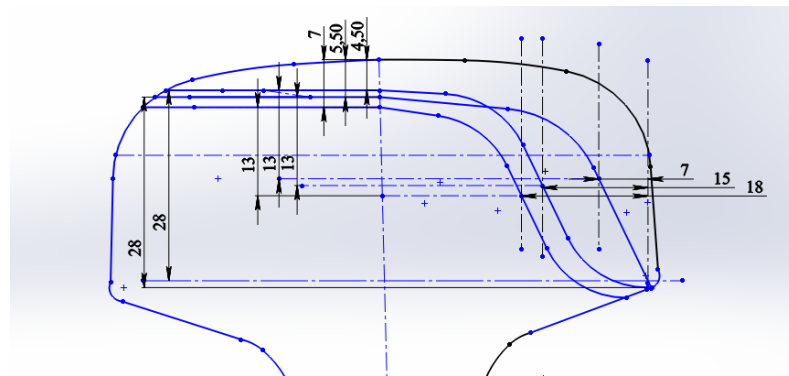


Рисунок 4.1 – Профілі головки рейок для різних експлуатаційних умов при яких рейки далі вважаються дефектними

За аналізом зміни поверхні кочення рейки в залежності від наявності вертикального зносу спостерігаємо різні залежності. Для рейок, що покладені вперше:

- при наявності вертикального зносу 0,1 мм поверхня кочення рейки змінює обрис радіусом 500 мм на пряму, та ширина зони контактів з бандажем колеса складає 20 мм;

- при наявності вертикального зносу 1,7 мм ширина зони контактів з бандажем колеса складає 49,1 мм, за рахунок зміни зони з радіусом 80 мм;

- при наявності вертикального зносу 2, 3 та 4 мм ширина зони контактів з бандажем колеса складає відповідно 51,50, 56,55 та 59,94 мм, за рахунок зміни зони з радіусом 15 мм.

Для старопридатних рейок з боковими зносами 7, 15 та 18 мм в неробочій грані та 0 мм з робочої:

- при наявності вертикального зносу 2 мм ширина зони контактів з бандажем колеса складає відповідно 39,63, 31,58 та 28,58 мм, за рахунок зміни зон з радіусом 15 мм;

- при наявності вертикального зносу 3 мм ширина зони контактів з бандажем колеса складає відповідно 42,16, 34,17 та 31,17 мм, за рахунок зміни зон з радіусом 15 мм;

- при наявності вертикального зносу 4 мм ширина зони контактів з бандажем колеса складає відповідно 43,85, 35,86 та 32,86 мм, за рахунок зміни зон з радіусом 15 мм.

При подальшій експлуатації старопридатних рейок ширина зони контактів з бандажем колеса зменшується за рахунок появи бокового зносу. Отже ширина контактної зони на поверхні кочення рейки в залежності від її зносу коливається в межах 12,82...59,94 мм та в середньому складає 37,98 мм.

Контакт бандажу з рейкою уявляє собою контакт двох циліндричних поверхонь з осями що перетинаються зі слабкою конічністю бандажу якою ігнорують. Напівширина площі контакту бандажу з рейкою визначається з теорії контактних деформацій Герца [356]:

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu)^2 Pr R_p}{E(r+R_p)}}, \quad (4.4)$$

$$b = \frac{n}{m} a ,$$

де  $m$ ,  $n$  – коефіцієнти рівняння еліпса дотику;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалів бандажу та рейки;

$P$  – навантаження від колеса на рейку;

$E$  – модуль пружності матеріалів;

$r, R_p$  , – радіуси колеса та закруглення головки рейки.

В процесі експлуатації профіль поверхні кочення бандажів наближається до обрису головки рейок і еліптична площадка контакту вироджується в прямокутну, ширина якої  $b_1$  визначається шириною рейки, а довжина півширини плями контакту в напрямку руху:

$$a = 1,526 \sqrt{\frac{Pr}{b_1 E}}, \quad (4.5)$$

За даними [357, 358] колеса мають «проектний» профіль, якщо вони нові, або, якщо вони вийшли з ремонту, отже 6-9 разів за терміні служби (в залежності від профілю обточки). При зміні товщини гребеня з 33 мм до 31 мм різні профілі різняться між собою (доля таких контактів складає 10-15%), при зміні товщини гребеня 31 мм до 29 мм профілі однакові у основі галтелі та відрізняються подальшою формою гребеня та ділянкою з конусністю 3,5 (доля таких контактів складає 35-40%). При зміні товщини гребеня 29 мм до 27 мм профілі однакові у основі галтелі і бокової робочої поверхні гребеня та відрізняються подальшою формою гребеня і ділянкою з конусністю 3,5 (доля таких контактів складає 35-40%). При товщині гребеня 27 мм та менше всі профілі набувають однакову форму (доля таких контактів складає 10-15%). Також можна зазначити, що майже 70% коліс мають обрис профілю за ГОСТ 9036-88, до 20% - за профілем ІТМ. Що стосується зносу бандажу, то розглянуті колісні пари з стандартним (ГОСТ 9036-88), ІТМ-73 та ДІТ УЗ профілями мають однаковий знос у зоні з конусністю 10 не в залежності від зносу гребеня. Знос бандажу поступово збільшується в зонах з конусністю 10 та 3,5, але характер зносу рівномірний.

З урахуванням досвіду робіт [355, 359...361] вплив співвідношення ширини колії та параметрів коливання рухомого складу в поперечній

площині можна оцінити -  $y$  ординатами геометричного центру контакту рейки та колісної пари відносно центрального положення колісної пари в прямій або в кривій:

$$y = y_0 \cos \omega x - y_R - y_p - y_{eio}, \quad (4.6)$$

де  $y_p$  - відхилення положення рейки від плану (рихтовка),

де  $y_{eio}$  - динамічні відхилення рейки (віджимми).

Центральне положення коліс в колії пов'язано величиною зазору між робочими боковими гранями рейок та коліс  $\delta = S - g$ , отже при відомих величинах зазорів обох контактів відомими є ординати центрального положення колісної пари в кривій та радіуси кочення по них обох коліс, але в ф. 4.6 не враховано форму контакту рейок та коліс.

При контакті нових коліс по поверхні кочення з новою рейкою, її вершина, як найвища точка, контактує з колесами зоною з конусністю 10 при зазорах  $0 < \delta < 34 \text{ мм}$  при всіх нахилах рейки, при  $\delta \geq 34 \text{ мм}$  колесо контактує ребром пересічення поверхні з ухілами 1/20 та 1/7 та зоною з конусністю 3,5. При контакті нових коліс з новою рейкою, відбуваються одноточковий або двоточковий контакти.

З появою вертикального зносу 0,1, 1,7, 2, 3, 4 з конусністю 10 при зазорах відповідно  $0 < \delta < 22 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 6,5 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 6 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 4,5 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 2 \text{ мм}$  при всіх нахилах рейки при більших значеннях зазору контакт відбувається по зоні з конусністю 3,5.

При контакті коліс і рейок, що мають знос до наведених значень необхідно додати до кожного зазору величини бокового зносу рейки  $h_{бок}$ , зносу колеса  $\Delta h$  та різницю з урахуванням рівнів обміру ширини гребеня та ширини колії (що коливається в межах 0,8...1,73 мм в залежності від куту нахилу гребеня  $\beta$ ), тобто:  $+h_{бок} + \Delta h + 3ctg \beta \text{ мм}$ .

При контакті коліс зі старопритатною рейкою з боковими зносами 7, 15 та 18 мм в неробочій грані контактування по поверхні кочення відбувається

по зоні з конусністю 10 при наявності вертикального зносу 2 мм відповідно  $0 < \delta < 17,9 \text{ мм}$  ,  $0 < \delta < 25,9 \text{ мм}$  ,  $0 < \delta < 28,9 \text{ мм}$  ; при наявності вертикального зносу 3 мм відповідно  $0 < \delta < 18,9 \text{ мм}$  ,  $0 < \delta < 26,9 \text{ мм}$  ,  $0 < \delta < 29,9 \text{ мм}$  ; при наявності вертикального зносу 4 мм відповідно  $0 < \delta < 18,1 \text{ мм}$  ,  $0 < \delta < 26,1 \text{ мм}$  ,  $0 < \delta < 29,1 \text{ мм}$  . При більших значеннях зазору контакт відбувається по зоні з конічністю 3,5.

Старопридатна рейка в початковий період має кут на викружці та одноточковий контакт по викружці при контактах збудь-якими колесами. Для інших випадків в режимах кочення і ковзання та в режимі ковзання відбуваються одноточковий та двоточковий конформні контакти.

На рис. 4.2 наведено профілі контактуючих рейок і коліс на різних стадіях експлуатації.

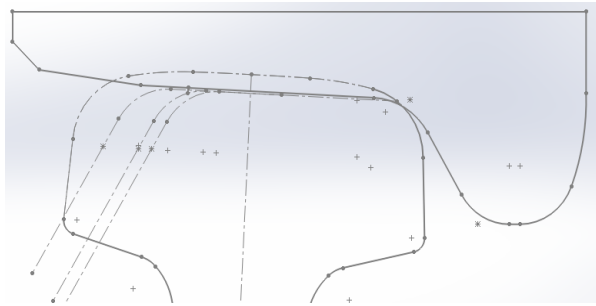


Рисунок 4.2 – Види контактів при різних станах рейок та нового колеса

Оскільки кривизна в головці рейки окреслена декількома радіусами, а рух має синусоїдальну траєкторію, то площадка контакту на бічній грані має забіг відносно площадки на поверхні кочення, та при зміні напрямку коливання відбувається ковзання, при якому контактні площадки наближуються до розташування обох в одному перетині. Забіг контактів розраховуються за наступними виразами:

$$\text{для нового колеса } z = \frac{(r_{o\delta} + \Delta r) \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \psi \operatorname{tg}^2 \alpha}}$$

$$\text{для зношеного - } z = \sqrt{(\Delta r_z + r_{o\delta})^2 - (\Delta r + r_{o\delta})^2}$$

де  $r_{o\delta}$  - радіус круга кочення ободу колеса з поверхнею кочення рейки;

$\Delta r$  - різниця радіусів контактів гребеня та ободу колеса з головкою рейки;

$\Delta r_z$  - різниця радіусів контактів гребеня та ободу колеса з головкою рейки в точках  $z=0$  та  $z$ ;

$\psi$  - кут нахилу гребеня,

$\alpha$  - кут набігання.

В табл. Б.1... Б.3 додатку Б наведено параметри розрахунку взаємодії колії та колісної пари за параметрами з [361... 365]. На рис. 4.1...4.3 наведено характерні залежності параметрів взаємодії колісної пари з рейками.

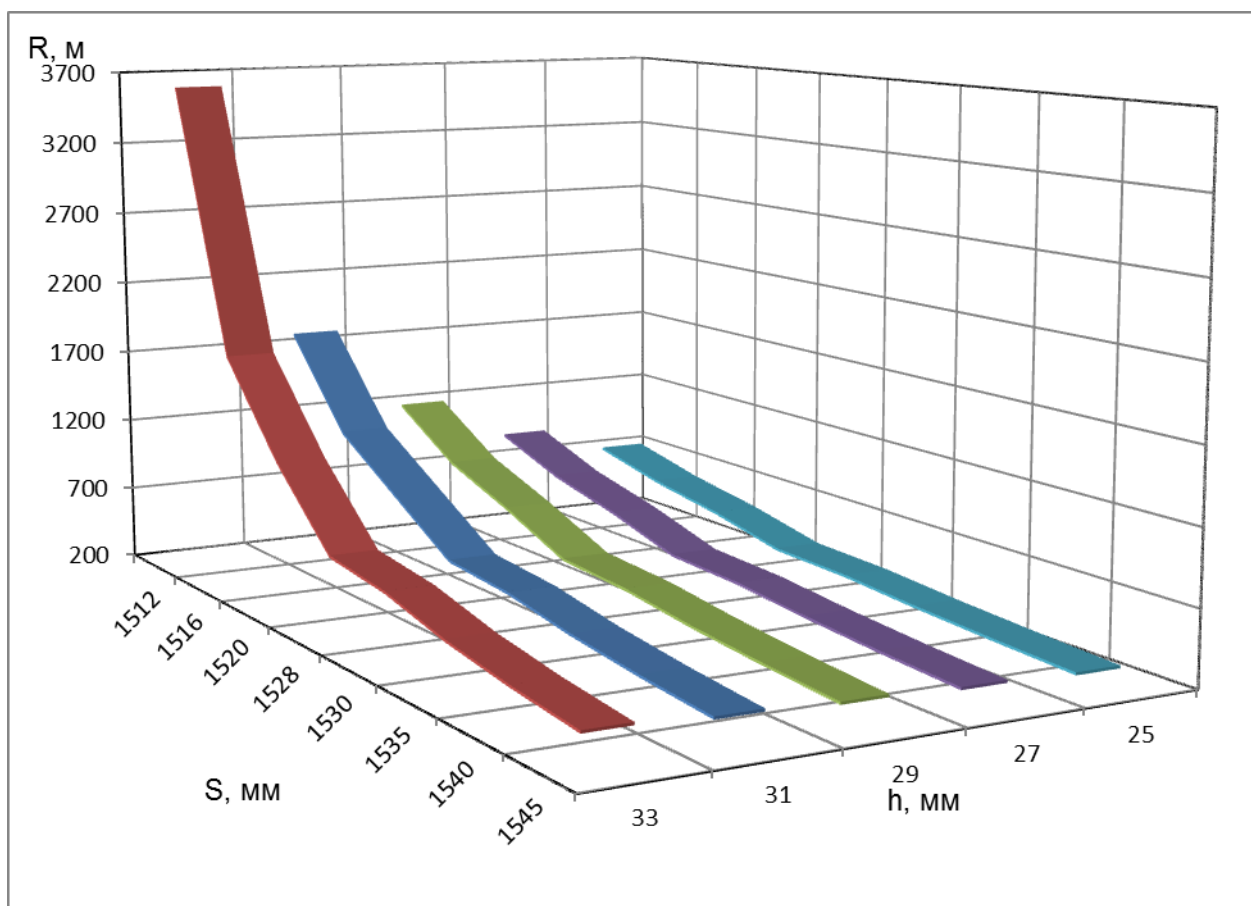


Рисунок 4.1 – Величини радіусів кривих при яких колісна пара завжди буде притиснута до зовнішньої рейки в залежності від ширини колії  $S$  та зношеності гребеня  $h$

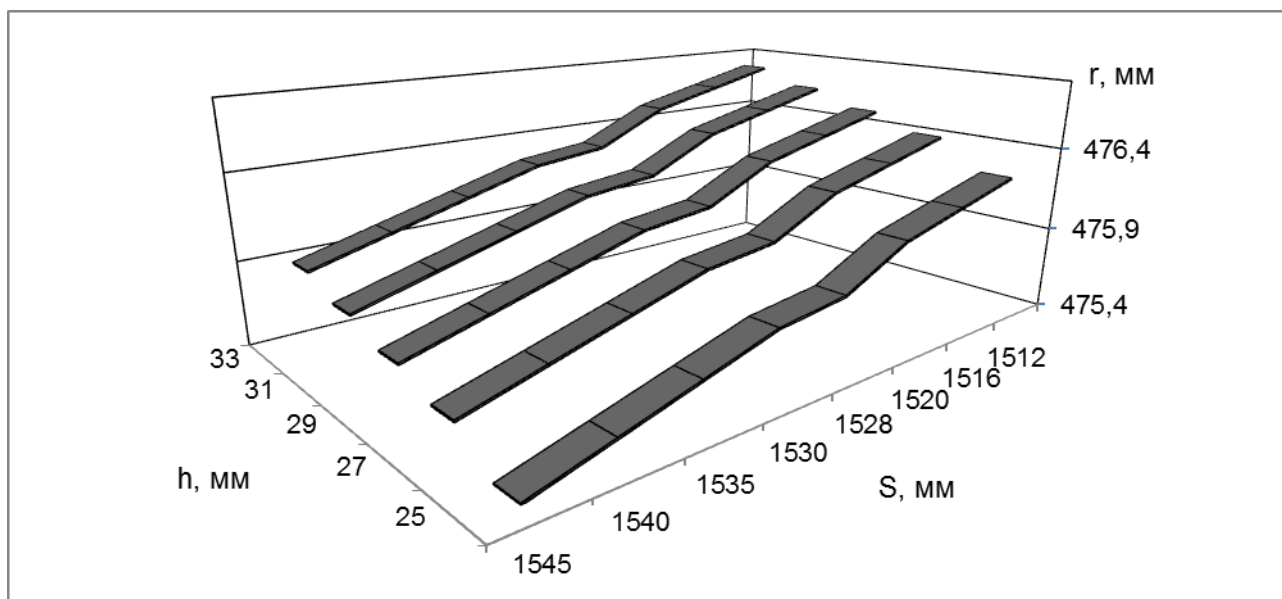


Рисунок 4.2 – Залежність значень середніх радіусів кочення в залежності від ширини колії та зношеності товщини гребеня до першої обточки.

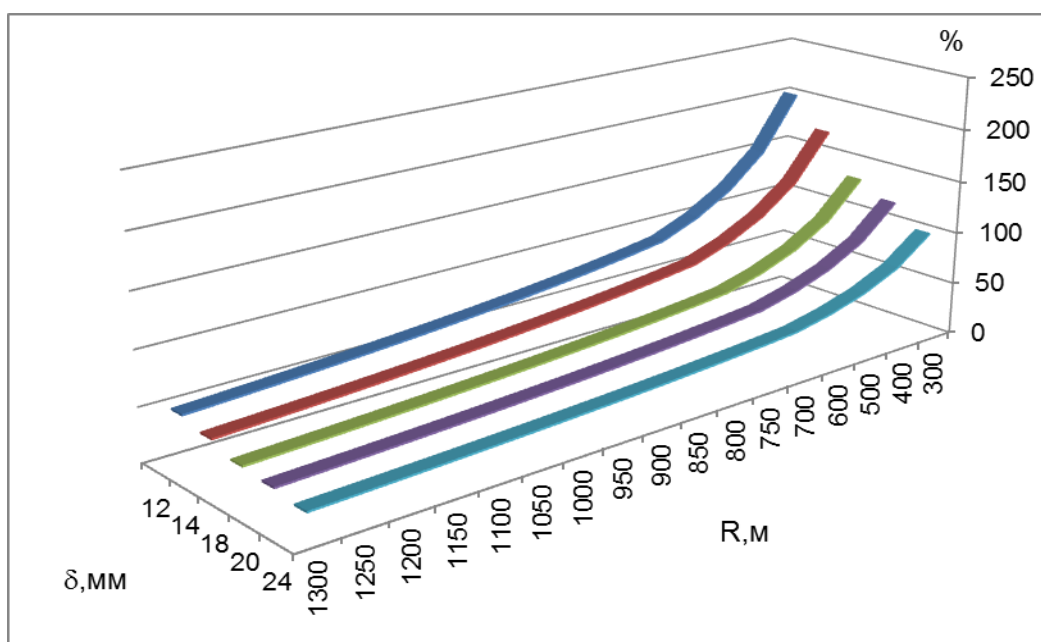


Рисунок 4.3 – Процентна частка зміщення кінетичної осі кривої від величини зазорів для різних радіусів кривих

За [334, 336, 362] для колії на залізобетонних шпалах встановлена швидкість може бути реалізована при ширині колії  $1520_{-10}^{+20}$  мм. При укладанні рейко-шпальної решітки ширина колії 1520 мм допуски +14...20 мм можуть бути реалізовані за рахунок допустимих значень зносу (14 мм при допустимому зносі обох рейок в прямих, або 15 мм чи 18 мм при зносі

зовнішньої рейки в кривих та 2 мм допуск при зборці рейко-шпальної решітки) допуск по звуженню можливий при перекосі шпал або порушення нахилу рейок. Така ширина колії припустима для кривих всіх радіусів. При ширині колії 1541...1546 мм швидкість обмежено до 60 км/год. яка властива кривим з радіусами 300...450 м, а при ширині колії 1547-1548 мм швидкість обмежено до 25 км/год.

При ширині колії 1512...1516 мм величина зазору в 75% коливається в межах 8...20 мм ( $y_R = 5...10$  мм,  $y = 0...10$  мм) та зовнішні рейки в кривих з радіусом нижче за 721...1802 м піддаються боковому сточуванню по всій довжині кривої. При ширині колії  $1520_{-4}^{+8}$  величина зазору коливається в межах 12...24 мм ( $y_R = 5...24$  мм,  $y = 0...13$  мм) та зовнішні рейки в кривих з радіусом нижче за 604...1204 м завжди піддаються боковому сточуванню по всій довжині кривої. При ширині колії 1530...1540 мм величина зазору коливається в межах 26...44 мм ( $y_R = 4...25$  мм,  $y = 0...35$  мм) та зовнішні рейки в кривих з радіусом нижче за 333...663 м завжди піддаються боковому сточуванню по всій довжині кривої. При ширині колії 1540...1545 мм величина зазору коливається в межах 36...49 мм ( $y_R = 10...25$  мм,  $y = 0...28$  мм) та зовнішні рейки в кривих з радіусом нижче за 300...408 м завжди піддаються боковому сточуванню по всій довжині кривої.

Отже, основним фактором, що впливає на знос рейок та коліс в кривій ділянці колії є фактична величина зазору між зовнішньою рейкою та колесом. На величину зазору впливають наступні чинники (ф. 4.6): співвідношення геометричних розмірів величин ширини колії та колісної пари, положення кінематичної осі кривої, динамічні відхилення рейки та відхилення положення рейки від плану. Перший, другий та четвертий чинники прямим чином пов'язані з величиною ширини колії, яка вважається визначальною при боротьбі зі зносом. Але при цьому, саме значення ширини колії є непрямим (побічним) фактором у фізичному процесі зносу. Третій чинник є незалежним від величини ширини колії, тому для визначення його

впливу на величину зазору необхідно проаналізувати процес деформативності колії від впливу колісної пари. Отже, величина ширини колії в кривих ділянках має передбачати наявність фактичного зазору між колесом та зовнішньою рейкою, який дорівнює або більше за зміщення між центральною та кінематичної осями кривої, але при цьому зазор між колесом та внутрішньою рейкою має бути не більшим за умов безпечного руху, тобто коли бандаж опирається на головку рейки тією частиною, що має уклон  $1/20$ .

#### **4.3. Алгоритм розповсюдження силової хвилі від динамічного навантаження в конструкції колії**

При вивченні деформативної роботи залізничної колії розглядається динамічний процес при якому пов'язані між собою такі задачі: визначення видів та величин сил, що діють на колію в залежності від положення колісної пари в колії, місця і види контактів коліс в залежності від станів коліс і рейок. Величини вертикальних сил визначаються як функції поздовжніх стискаючих сил за методикою Блохіна Є.П. [366] з використанням методик Єршови Н.М. [367] та Мямліна С.В [368], що дозволяють оцінювати динамічну завантаженість не тільки поодинокого рейкового екіпажу, а й рейкового екіпажу у складі поїзда з урахуванням поздовжніх сил. Величини рамних сил визначаються за залежностями [369]. Аналіз впливу стану рейок і коліс на параметри контакту їх взаємодії показав, що під час коливального процесу мають місце одноточковий, двоточковий та конформні одноточкові та двоточкові контакти. Фізичний процес коливання визначається двома видами хвиль. Об'ємні хвилі характеризують коливання системи за рахунок дії зовнішнього впливу. Геометрія конструкції визначає процес розповсюдження об'ємних хвиль. Це найбільш швидкі хвилі. Амплітуда сили визначає амплітуди коливання точок елементів та геометричні параметри

конструкції задіяної в процесі коливання. Але необхідно враховувати, що об'ємні хвилі значно зменшують частку поперечних хвиль при розповсюдженні у зволожених матеріалах, зводячи її значення до нуля у воді та повітрі. Тобто наявність труб, мостів та інших штучних споруд значно впливають на наявність поперечних хвиль та на розповсюдження об'ємних хвиль. Поверхневі хвилі характеризують коливання вільних та дотичних поверхонь за рахунок дії сил натягування. Вони мають локальну дію, меншу швидкість розповсюдження та їх розповсюдження не залежить від наявності води або повітря.

В процесі руху контактна площадка колеса з рейкою має змінне навантаження від рухомого складу, що діє певний час в залежності від швидкості руху. Отже, має місце цикл передачі навантаження від колеса до рейки по певній площині, що повторюється по довжині рейки. Також має місце циклічний рух по довжині відносно опор, в якому контактна площадка колеса з рейкою знаходиться на відрізку від середин однієї опори до іншої. При цьому існує симетрія передачі коливань від рейки на опори відносно середини шпального ящика. При передачі навантажень від рейки до опор також спостерігається цикл при якому навантаження, що прикладене до однієї контактної площадки передається на певну кількість опор. Та надалі викликає ще два цикли при першому навантаження передаються на баластний шар, а при другому – на земляне полотно. Отже, якщо розглянути розповсюдження імпульсу динамічного навантаження силовими хвилями в конструкції колії, то маємо наступні положення.

По-перше, кожне динамічне навантаження має два види частот: перший вид частоти відображає частоту імпульсу сили, а другий – частоту прикладання сили в одному перетині. Перша відповідає за щільність та інтенсивність передачі імпульсу сили в окремому коливанні. А друга – за щільність та інтенсивність передачі імпульсу сил в сукупності коливань.

По-друге, кожне коливання має свою частоту та зону дії. Передача навантаження від рухомого складу на колію формується наступними коливальними процесами:

- колеса передають навантаження на колію через контактну площадку за час, що залежить від швидкості руху. За час дії навантаження  $t$  який формує частоту передачі імпульсу на площу контакту  $\omega_f$  (частота збудження імпульсом сили перетину рейки), що при швидкостях від 10 до 120 км/год. коливається від 1361,6204 до 14266,598  $\text{с}^{-1}$  за  $t$  час від 0,00462 до 0,00044 с. Геометрична зона дії колеса залежить від розташування контактної площадки. Передача навантаження від колеса є коливанням, що повторюється по довжині рейки. Розкид (діапазон) параметрів коливання залежить від швидкості руху та параметрів контакту;

- вплив колісних пар уявляє собою коливання сукупності дії двох коліс з їх частотою передачі імпульсу навантаження  $\omega_f$  (частота збудження перетинів рейок) та з сукупною зоною дії. Діапазон параметрів цього коливання по довжині колії залежить від швидкості руху та розташування колісної пари в колії ;

- вплив візків на колію формує коливання з частотою передачі імпульсу сили на рейки  $\omega_r$  (частота збудження рейок візком), яка залежить від швидкості руху та геометрії візка. Діапазон параметрів цього коливання по довжині колії залежить від швидкості руху та положення візка відносно колії;

- вплив вагонів на колію формує два види коливання. Перше з частотою збудження рейки суміжними візками суміжних вагонів  $\omega_w$  (частота збудження рейок вагонами), друге – з частотою циклу збудження рейки суміжними візками вагонів поїзда  $\omega_{rs}$  (частота збудження рейок поїздом). Обидві залежать від швидкості руху та геометрії вагонів. Діапазони параметрів коливання по довжині колії залежать від швидкості руху та положення вагонів відносно колії;

- вплив вагонів на рейки формує три процеси коливання. Перший це власні коливання рейки з власною частотою, що залежить від характеристик жорсткості матеріалу та ваги рейки. Другий - коливання опор з частотою, що залежить від швидкості руху та епюри шпал  $\omega_{st}$  (частота збудження вагонами опор). Останні коливання формують як процес коливання групи опор так і третій процес - коливання рейок, викликане реакціями групи опор.

- вплив рейок на опори формує чотири процеси коливання. Перший це власні коливання опор з власною частотою коливання. Другий та третій – коливання основи групою опор та процес коливання опор, викликаний реакціями основи. Четвертий – власні коливання основи.

Отже загальний вид навантаження, що діє зі сторони рухомого складу на колію в одному перетині рейки має вид:

$$F = F_0 \sin(\omega_f t) (k_{ii} \sin(\omega_i t) + k_{iw} \sin(\omega_w t) + k_{irs} \sin(\omega_{rs} t)), \quad (4.7)$$

де  $F_0$  – максимальне значення, що набуває сила в перетині;

$k_i$  – коефіцієнт, що враховує згасання сили за відповідним напрямком.

По-третє, кожен елемент конструкції має свою частоту, амплітуду, цикл та швидкість коливання, які є результуючими діючих на них коливань.

По-четверте, кожна конструкція має свою частоту, амплітуду та швидкість коливання які є результуючими коливань складових елементів.

#### **4.4.Вплив елементів колії на розповсюдження процесу деформативності магістральної та промислової колій**

Розповсюдження вимушених та власних коливань залежать від фізико-конструктивних характеристик елементів колії, адже вони формують

геометрію зони розповсюдження процесу деформативності в конструкції колії. Для аналізу впливу характеристик елементів колії на формування деформативного стану колію аналізуються коливальні особливості кожного елемента конструкції колії.

Рейки. За стандартною методикою розрахунків вважають, що тип рейок не впливає на модуль пружності підрейкової основи колії в вертикальній площині. За цією методикою вважають, що рейка знаходиться під статичним навантаженням та опирається на рівнопружну основу. В основі статичного розрахунку прийнята гіпотеза про лінійну залежність між тиском на одиницю площі основи і пружною осадкою основи. Для вирішення задач, що охоплює ця методика ці положення припустимі та введення основи з багатьох опор поліпшують результат на 5-7%. [110] Але зазначені припущення мають вагомість якщо розглядаються не тільки максимальні значення величин, що виникають в колії по її перетину в вертикальній площині, а й просторові зміни.

Рейки уявляють собою суцільний твердотільний пружний елемент. Властивості матеріалу рейок не залежать від водонасичення та мають однотипну здатність розподілення навантажень. На рис. 4.4...4.6 показано як геометричні розміри рейок впливають на розповсюдження навантаження.

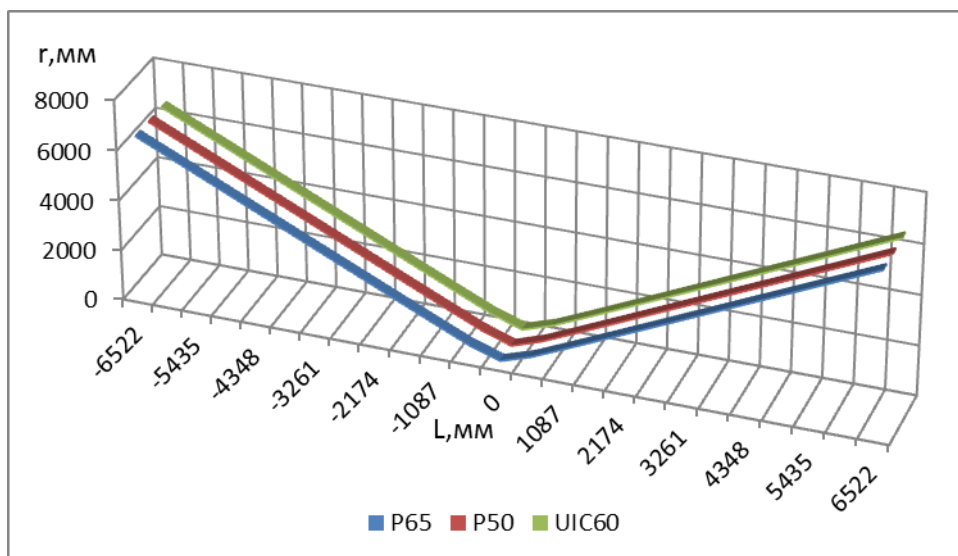


Рисунок 4.4 – Залежність радіусу розповсюдження сили від типу рейок.

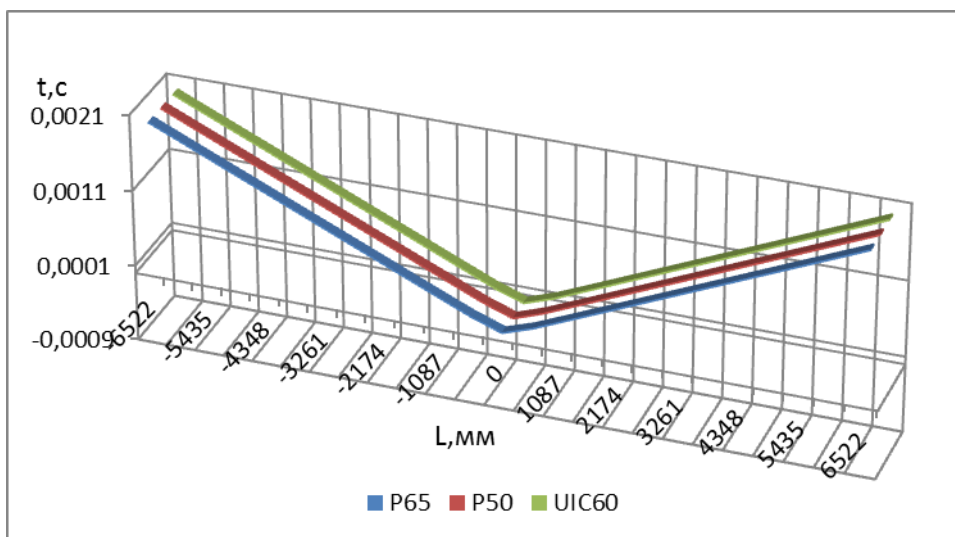


Рисунок 4.5 – Залежність часу досягнення шпал силою від типу рейок.

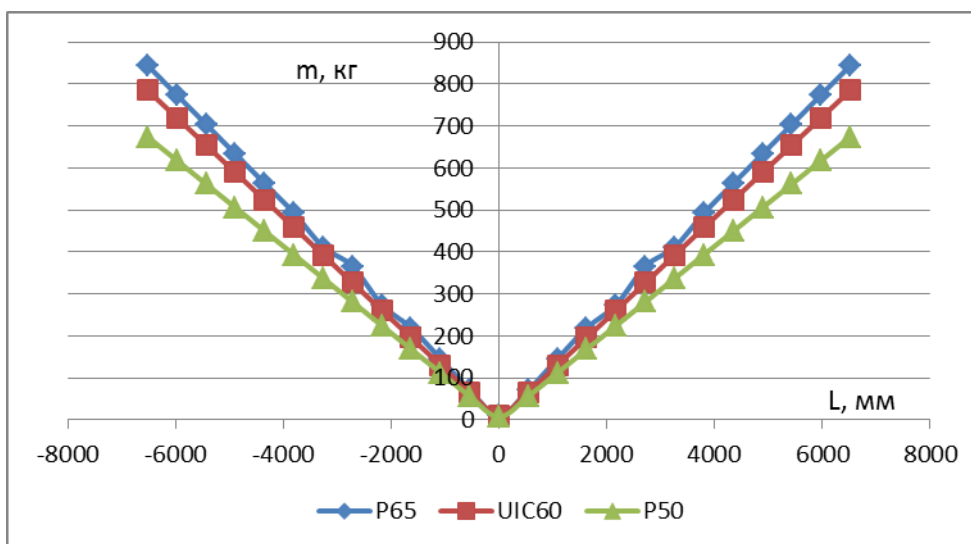


Рисунок 4.6 – Залежність маси рейки при розповсюдженні сили від типу рейок.

Особливістю сприймання навантаження рейками є властивість розподілення цього навантаження по її довжині. При розповсюдженні навантаження різниця значень радіусів розповсюдження сили та часу її досягнення шпал залежать від швидкості розповсюдження. Остання залежить від куту між напрямком дії сили та радіусом розповсюдження сили. Різниця значень кутів для різних типів рейок, при однакових умовах прикладання сили, залежить від геометричних розмірів перетину рейки та призводить до нерівномірного залучення мас рейок в процес переробки навантаження по довжині колії. Так при збільшенні кутів розповсюдження сили для P65 з

UIC60 та P65 з P50 відповідно на 0,08...1,1% та 0,3...3,7% зменшується швидкість розповсюдження сили відповідно на 0,002...0,4% та 0,005...0,7% та збільшення маси відповідно на 5...11% та 18...26%. Цю особливість необхідно застосовувати при розробці оптимальних розмірів рейок.

Скріплення. Особливість роботи скріплення з точки зору роботи конструкції колії обумовлена роботою прокладок. Швидкість розповсюдження навантажень в прокладках значно нижча ніж в рейках (в 11,5 разів). За час проходження силою прокладки товщиною у 8 мм залучається в роботу додаткових 180 мм рейки, які збільшують масу опору конструкції в залежності від типу рейок на 18...23,4 кг, та зменшують значення амплітуди коливань, що надходять до неї в 1,99 рази.

Шпали. Особливістю роботи шпал є збудження коливань з частотою збудження вагонами опор  $\omega_{sl}$ . Тобто загальне навантаження, що діє на основу:

$$F = F_0 \sin(\omega_f t) (k_{it} \sin(\omega_t t) + k_{iw} \sin(\omega_w t) + k_{ius} \sin(\omega_{rs} t) + k_{isl} \sin(\omega_{sl} t)), \quad (4.8)$$

Окрім того, шпали мають значну масу, що збільшує масу опору конструкції на 487,6 кг/пог. м, та тільки на 3% зменшують амплітуду коливань, що надходять до неї.

Рейко-шпальна решітка складається з твердих елементів. Вони виготовлені як типові конструкції та їх характеристики коливаються в установлених межах. Основа колії складається з сипучих матеріалів, властивості яких змінюються при зволоженні та промерзанні, що є основною її особливістю. Жодного деформативного нормативу з основи не існує.

Баласт. Швидкість розповсюдження навантажень в баластному шарі значно нижча ніж в шпалах (в 3,8 разів). За час проходження силою баластного шару товщиною у 40 мм залучається в роботу додаткових 6,76 м рейки та 12 шпал, які збільшують масу опору конструкції в залежності від

типу рейок на 3856...4058,8 кг, та зменшують значення амплітуди коливань, що надходять до нього в 1,96 рази.

Земляне полотно. Якщо характеристики рейко-шпальної решітки та баластного шару мають постійні характеристики по довжині колії, то характеристики земляного полотна не регульовані. Отже вони значно впливатимуть на розкид характеристик конструкції колії. Тому основною особливістю роботи земляного полотна є сприяння накопичення залишкових деформацій. Значення амплітуди коливань, що надходять до нього зменшуються в 1,73 рази.

Навантаження від рухомого складу на колію передається у вигляді імпульсу, що дорівнює добутку сили на час дії. Сила має змінне значення. Час дії залежить від довжини контактної площі  $a$  та швидкості руху рухомого складу  $V$ :

$$dp = Fdt = \int_{t_1}^{t_2} Fdt = 0.5F_{cp}\Delta t = \frac{a}{V} F_{cp}, \quad (4.8)$$

За основним законом динаміки його дія розповсюджується на конструкцію колії причому:

$$dp = d(mV_{\text{колій}}), \quad (4.9)$$

Отже, маємо значення маси конструкції колії, яка буде задіяна для реакції на вплив рухомого складу.

Зі збільшенням швидкості руху значення імпульсу діючого на конструкцію колії значно зменшується, так при швидкості 10 км/год. для вантажного вагону становить 506,2097 кг м/с, при 120 км/год. - 72,57995 кг м/с. Отже, при збільшенні швидкості руху зменшується маса конструкції колії, яка задіяна в реакції на вплив імпульсу однієї сили. Це означає, що глибина конструкції сприймання імпульсу сили зменшується. Залежність

значень часу проходження елементів за глибиною, тобто всіх елементів, та за розповсюдженням по довжині колії наведено на рис. 4.7. Залежність наведено для наступних умов: сила діє на рейку типу Р65 зі скріпленням КПП-5-К в перетині середини шпали з номером 0, по довжині результати наведено для 13 шпал (0...12), товщина баластного шару 0,4 м.

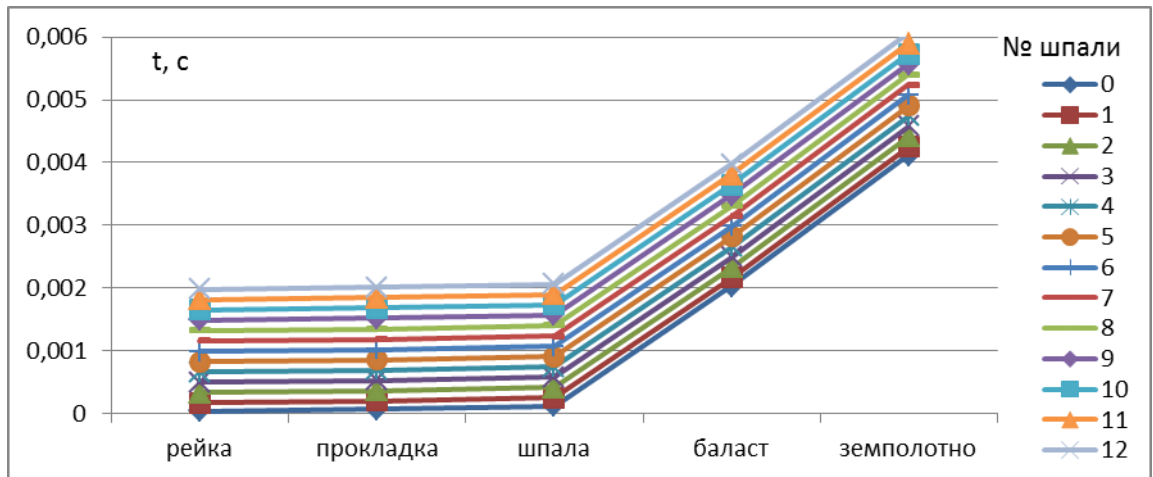


Рисунок 4.7 – Залежність часу розповсюдження навантажень по довжині та глибині конструкції колії.

Час розповсюдження з вказаного перетину для будь-яких навантажень є величиною не змінною. Але час дії навантаження є змінною величиною та для вантажного вагону, що рухається зі швидкістю 10 км/год. становить 0,0046145 с, а з швидкістю 120 км/год. - 0,0004404 с. На рис. 4.8...4.11 наведено співвідношення часу дії сили та часу проходження сили по глибині для різних швидкостей руху.

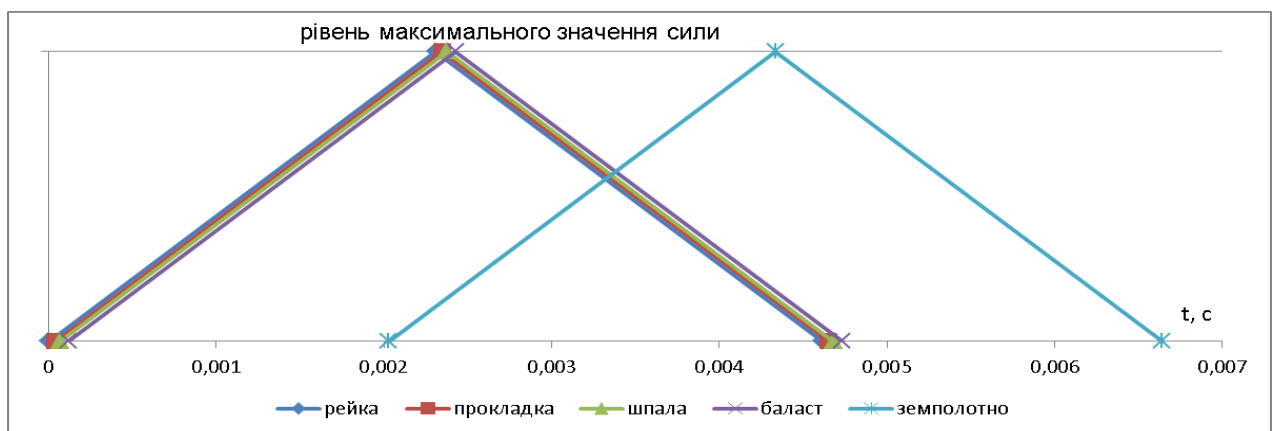


Рисунок 4.8 – Співвідношення часу дії сили в кожному елементі колії в одному перетині для швидкості руху  $V=10$  км/год.

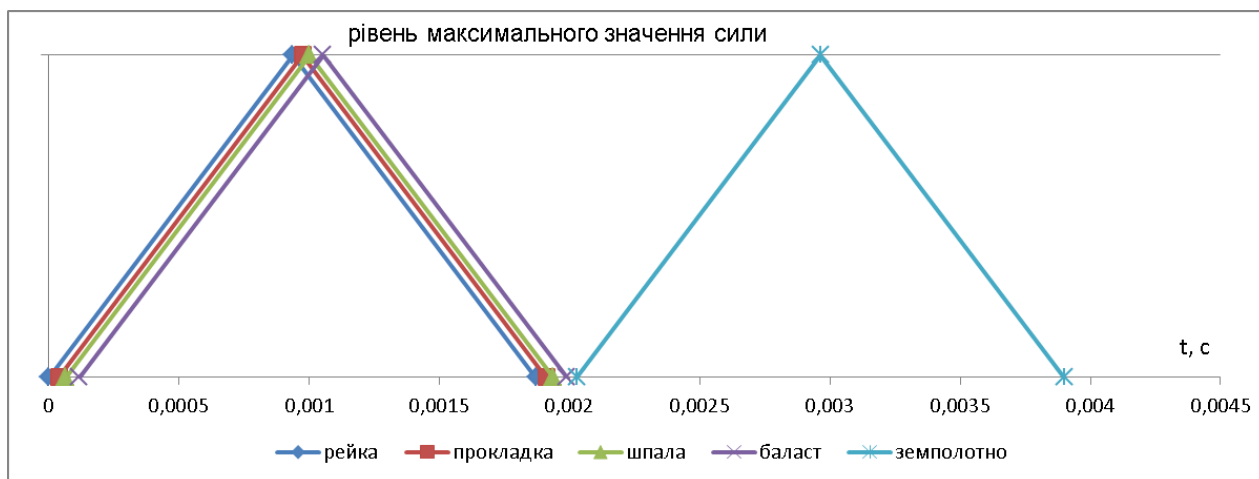


Рисунок 4.9 – Співвідношення часу дії сили в кожному елементі колії в одному перетині для швидкості руху  $V=25$  км/год.

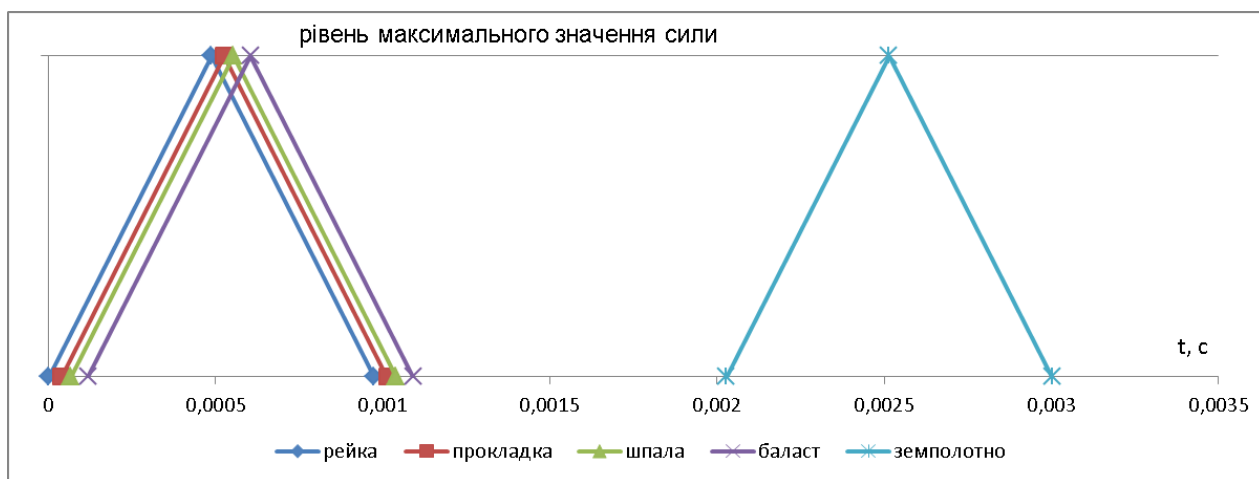


Рисунок 4.10 – Співвідношення часу дії сили в кожному елементі колії в одному перетині для швидкості руху  $V=50$  км/год.

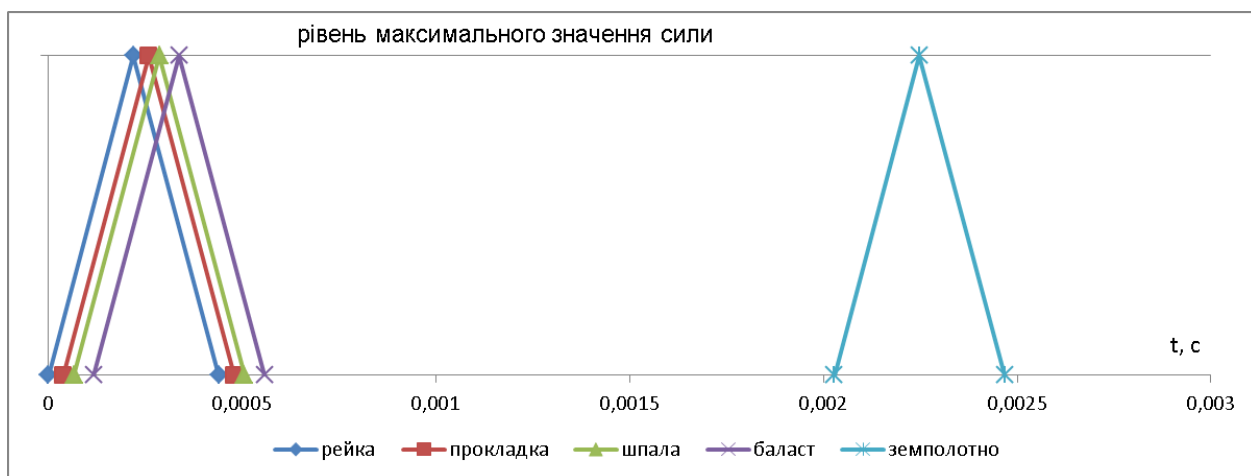


Рисунок 4.11 – Співвідношення часу дії сили в кожному елементі колії в одному перетині для швидкості руху  $V=120$  км/год.

Отже за табл. Б.4 та рис. 4.8...4.11 спостерігаємо, що для швидкостей до 25 км/год. всі елементи колії задіяні в колюванні. При більших швидкостях руху в колюванні задіяні рейко-шпальна решітка та верхня частина баласту товщина якого коливається в межах від 8,2 до 36 см, отім колювання земляного полотна відбуваються при відсутності дії сили. навантаження від рухомого складу мають цикл повторюваність передачі навантаження по довжині рейки.

#### **4.5.Висновки по розділу 4**

1. Проаналізовано зміну обрису коліс та рейок в процесі експлуатації та визначено ширину контактної зони на поверхні кочення рейки в залежності від наявності вертикального та горизонтального зносів, значення яких коливаються в межах 12,82...59,94 мм.

2. Визначено величини зазорів між колесом та рейкою, при яких відбувається безпечний рух (бандаж опирається на головку рейки частиною з уклоном 1/20) в залежності від наявності вертикального та бокового зносів рейок.

3. Визначено основні види контактів в залежності від стану рейки. Так при контакті нових коліс з новою рейкою, відбуваються одноточковий або двоточковий контакти. Старопридатна рейка в початковий період має кут на викружці та одноточковий контакт по викружці при контактах з будь-якими колесами. Для інших випадків в режимах кочення і ковзання та в режимі ковзання відбуваються одноточковий та двоточковий конформні контакти.

4. Встановлено: основним фактором, який впливає на знос рейок та коліс в кривій ділянці колії, є фактична величина зазору між зовнішньою рейкою та колесом. На величину зазору впливають наступні чинники: співвідношення геометричних розмірів величин ширини колії та колісної

пари, положення кінематичної осі кривої, динамічні відхилення рейки та відхилення положення рейки від плану. Визначено співвідношення величин ширини колії та радіусів кривих при яких зовнішня рейка сточується по всій довжині кривої при проході рухомого складу.

5. Розповсюдження імпульсу динамічного навантаження силовими хвилями в елементах конструкції колії описано як процес розповсюдження об'ємних поздовжніх та поперечних сферичних хвиль, з урахуванням їх властивостей, що дозволило отримати аналітичні залежності розповсюдження динамічного навантаження. Алгоритм розповсюдження силової хвилі на конструкцію колії показав, що :

- в процесі руху контактна площадка колеса з рейкою має змінне навантаження від рухомого складу, що діє певний час в залежності від швидкості руху та мають місце цикл передачі навантаження від колеса до рейки по певній площині, та цикл повторюваності передачі навантаження по довжині рейки;

- кожне динамічне навантаження має два види частот: перший вид частоти відображає частоту імпульсу сили, а другий – частоту прикладання сили в одному перетині. Перша відповідає за щільність та інтенсивність передачі імпульсу сили в окремому коливанні. А друга – за щільність та інтенсивність передачі імпульсу сил в сукупності коливань;

- кожне коливання має свою частоту та зону дії;

- кожен елемент конструкції має свою частоту, амплітуду, цикл та швидкість коливання, які є результуючими діючих на них коливань,

- кожна конструкція має свою частоту, амплітуду та швидкість коливання які є результуючими коливань складових елементів.

6. Аналіз впливу елементів колії на формування її деформативного стану, дозволив визначити особливості сприймання навантажень елементами конструкції колії.

Результати, що наведені в розділі, опубліковані в [33, 54].

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАТИВНОСТІ КОЛІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

#### 5.1. Врахування розбіжностей між квазідинамічними та динамічними характеристиками навантажень

Зазвичай, в практичних розрахунках вважають, що сила інерції пов'язана з коливаннями необресореної маси колеса  $m_k$  та коливань маси системи з конструкцій  $m_{зк}$ , які пропорційні між собою та сконцентровані в точці контакту:

$$m_{зк} = \alpha_{зк} m_k, \quad (5.1)$$

Значення коефіцієнту пропорційності  $\alpha_{зк}$  рекомендують приймати для колії з дерев'яними шпалами  $\alpha_{зк} = 1,31$  для колії з залізобетонними шпалами  $\alpha_{зк} = 1,48$  [370]. Значення мас колії з дерев'яними шпалами  $m_{зк} = 1,52$  кНс<sup>2</sup>/м [371].

Виникаючу силу інерції визначають як:

$$P_{ін} = (1 + \alpha_{зк}) m_k \ddot{s}, \quad (5.2)$$

Окрім вказаних сил інерції, в системі конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії діють сили опору. Вони в свою чергу поділяються на пружні, що мають назву сили відновлення:

$$F_T = ks, \quad (5.3)$$

де  $k$  - жорсткість.

Та дисипативні, до яких відносяться:

- сили тертя, що залежать тільки від характеристик контактуючих поверхонь:

$$F_{TP} = fV, \quad (5.4)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя;

$V = \frac{ds}{dt}$  - швидкість переміщення.

- сили в'язкого тертя

$$F_{TP} = bV, \quad (5.5)$$

де  $b$  - коефіцієнт опору середовища.

Загальне рівняння руху має вид:

$$F - ks - b \frac{ds}{dt} - f \frac{ds}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2}, \quad (5.6)$$

$$F = F_A \sin \omega t, \quad (5.7)$$

де  $F_A$  - максимальне значення сили при дії рухомого складу на колію, тобто її амплітуда;

$\omega t$  - коливається від 0 до  $\pi$ , та за цей час  $t$ , що залежить від швидкості руху, контактна площа взаємодії колеса та рейки передає весь цикл впливу на колію: тиск з'являється, поступово збільшується до максимального, та згасає.

Отже розв'язання загального рівняння ф. 5.6 було вирішено у другому розділі, але застосування цього рішення має деякі особливості.

Необхідно врахувати результати отримані у четвертому розділі, де доведено, що кожна динамічна сила має два види частот. Методика де вважалось, що частотою сили є частота її повторення, може бути застосована

тільки в рамках квазідинамічних моделей. Якщо розглядати динамічний процес з деформативної роботи залізничної колії, то необхідно врахувати, що сила, яка впливає на будь-який елемент має імпульс впливу, який розповсюджується на подальші елементи конструкції колії. Якщо вважати, що її частота імпульсу має визначатися за частотою її повторення, то маємо абсурдне рішення, де одно і те саме колесо, рухаючись по рейці з однаковим станом по довжині та з однаковою швидкістю має викликати коливання з різними частотними параметрами тільки тому, що воно розташовано наступним в візку або в іншому візку чи вагоні. Час впливу рухомого складу на залізничну колію залежить від швидкості руху. Час протікання цих процесів залежить від фізико-конструктивних характеристик елементів конструкції залізничної колії. Існуючі методи розрахунку параметрів напружено-деформованого стану колії від впливу рухомого складу за канонами методу скінченних або граничних елементів в повній мірі описують фізико-конструктивні характеристики елементів конструкції колії. Але вони зовсім не враховують такі явища як час проходження навантаженням елементів колії, час появи реакцій цих елементів на навантаження та співвіднесення часу дії навантаження та часу процесу сприймання цього навантаження елементами конструкції колії. Відсутність часової складової не дозволяє описати динамічні процеси в повній мірі. Використання квазідинамічних методів змінюють сутність динамічних процесів. Так, прикладання квазідинамічних сил викликають квазістатичні збудження, при яких прогин рейок і опорної системи переміщується разом з рухом поїзда незважаючи на розбіжність появи за часом максимальних прогинів в елементах конструкції колії.

При таких дослідженнях виконують розрахунки для різних значень частоти квазістатичного збудження, що визначаються як відношення швидкості руху до величин відстаней між колесами одного візку та суміжних візків, або відстанню між опорними елементами колії. І хоча всі визнають, що швидкість руху впливає на частоту збудження, але величину частоти

збудження, що визначається обернено пропорційно до часу дії динамічного навантаження на колію (швидкості руху до довжини площадки контакту) в цих розрахунках не застосовують. За фізичною суттю частота збудження, що обернено пропорційна геометричним довжинам розташування коліс в поїзді характеризує циклічність появи навантаження в розглянутому перетині колії. Та для статичних розрахунків характеризує частину сили, що діє в розглянутому перетині колії в певний момент часу. При русі навантаження змінюється відстань між місцем прикладання сили та розглянутим перетином. Отже змінюється не тільки частка величини сили, що діє в розглянутому перетині а й вектор сили А частота збудження, що обернено пропорційна часу дії навантаження за фізичною суттю характеризує імпульс навантаження, що діє на колію та дозволяє використовувати основне рівняння динаміки.

Отже для дослідження динамічних процесів деформативності колії необхідно врахувати розбіжності між статичними та динамічними характеристиками навантажень.

## **5.2. Особливості геометрії навантаження вимушених коливань**

Як було зазначено у другому розділі, коливальний процес розповсюджується за рівнянням ф. 2.4, де мають місце вільні та вимушені коливання. Вимушені коливання розповсюджуються за хвилями, що за своєю формою наближені до еліпсоїда. Еліпсоїд, що побудований для кожного моменту часу розповсюдження коливань характеризує хвильові поверхні – поверхні постійної фази. Але кожний імпульс має час своєї дії, отже він характеризує фронт хвилі – поверхні, що відокремлюють точки середовища тих, що є в спокої від тих, що задіяні в певний час вимушеним імпульсом. Таким чином втілено принцип Гюйгенса. Цей принцип дозволяє визначити

фронт хвилі при нестационарному хвильовому процесі, що виникає при русі джерела коливань в нерухомому середовищі та володіє ефектом Доплера при його реєстрації в експериментах. При розгляданні процесу деформативності колії маємо випадок, коли джерело коливань (колесо), що рухається по рейці, має меншу швидкість ніж швидкість розповсюдження коливань в елементах колії. Тобто фронт хвилі буде мати еліпсоїдну форму та швидкість за напрямком розповсюдження становить:

$$u(r) = \frac{(C_t - V \sin \beta) C_l}{\sqrt{(C_t - V \sin \beta)^2 \cos^2 \alpha + C_l^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (5.8)$$

де  $C_t$ ,  $C_l$  - відповідно поперечна та поздовжня швидкості розповсюдження хвилі в певному середовищі;

$\alpha$  - кут між радіусом розповсюдження хвилі в певній точці середовища до напрямку розповсюдження імпульсу сил (кут в вертикальній площині);

$\beta$  - кут між радіусом розповсюдження хвилі в певній точці середовища до позитивного горизонтально поперечної напрямку розповсюдження сили (кут в горизонтальній площині).

Локальна система координат сили для кожного розповсюдження коливання завжди розташована таким чином, що вісь  $X$  співпадає з напрямком руху сили, а вісь  $Z$  - з напрямком дії сили. Пояснення до напрямків та кутів наведено на рис. 5.1. Компоненти хвильового вектора по осях координат, що визначають площини рівних фаз та амплітуд коливального руху, залежать від розташування локальної системи координат сили відносно основної системи координат конструкції. Отже розташування локальної системи координат сили відносно основної системи координат конструкції визначає як напрямки розповсюдження подовжніх та поперечних хвиль так і поляризацію цих хвиль. Оскільки імпульсом коливань є еліпсоїд з параметрами розповсюдження зазначеними в (5.8), що викликає як звичайні так і неоднорідні об'ємні хвилі, то при переході коливального процесу з

одного елемента конструкції в інший, характер хвильових процесів в цих елементах також залежатиме від розташування локальної системи координат сили відносно основної системи координат конструкції.

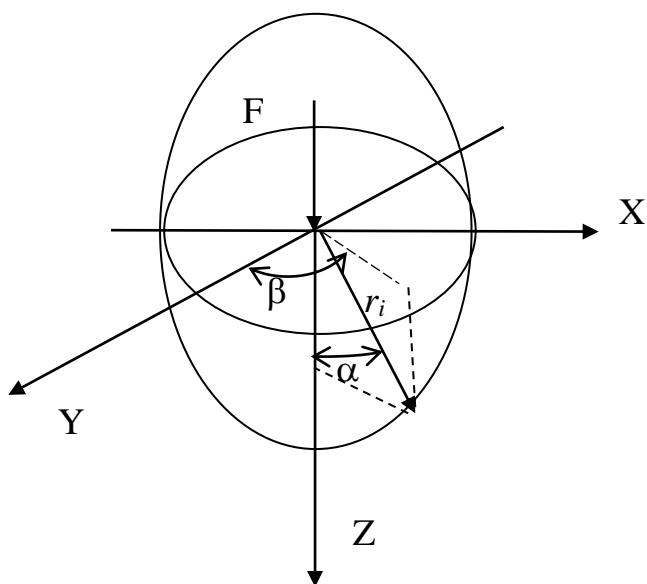


Рисунок 5.1 – Визначення напрямків та кутів розповсюдження коливань

В табл. 5.1 наведено основні характеристики елементів конструкції колії по яких розраховано швидкості розповсюдження хвиль.

Таблиця 5.1

### Фізичні характеристики елементів конструкції залізничної колії

Елемент/ матеріал	Щільність, кг/м <sup>3</sup>		коэф. Пуассона		Модуль деформації E, МПа		C <sub>1</sub> , м/с		C <sub>т</sub> , м/с		
рейка	7830	7830	0,24	0,3	2,1x10 <sup>5</sup>	2,1x10 <sup>5</sup>	5622	6008	3288	3211	
клема	7680	7680	0,26	0,33	2,12x10 <sup>5</sup>	2,15x10 <sup>5</sup>	5811	6440	3309	3244	
ізовкладиш	910	930	0,4	0,499	120	260	531	2187	217	305	
прокладка	918	935	0,3	0,485	100	200	382	1572	204	268	
шпала	2200	2500	0,1	0,15	36000	40000	4090	4110	2727	2637	
балласт	1900	2200	0,2	0,2	100	400	241	449	148	275	
супісок	170	175	0,3	0,35	30	40	487	605	260	290	
великулам- кові	140	220	0,2	0,27	100	400	890	1507	545	846	
пісок	150	180	0,3	0,35	18	50	401	667	214	320	
суглинок	середній /важкий	155	160	0,35	0,37	15	25	394	667	189	238
	легкий	160	165	0,35	0,37	30	40	548	654	263	297
глина	145	220	0,42	0,45	20	200	593	953	220	674	

Сучасна швидкість руху поїздів складає різну частину від швидкості розповсюдження, ці процентні частки наведено в табл. 5.2

Таблиця 5.2

**Процентна частка швидкості рухомого складу від швидкості розповсюдження коливань в елементах конструкції залізничної колії**

Елемент/ матеріал	Швидкість рухомого складу V, км/год.											
	25	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180	200
рейка	0,211	0,338	0,422	0,507	0,591	0,676	0,845	1,014	1,183	1,352	1,521	1,69
клема	0,209	0,336	0,420	0,504	0,588	0,672	0,840	1,007	1,176	1,343	1,511	1,68
ізовкладиш	3,200	5,120	6,400	7,681	8,961	10,241	12,80	15,36	17,92	20,48	23,04	25,60
прокладка	3,404	5,447	6,808	8,170	9,532	10,893	13,62	16,34	19,06	21,79	24,51	27,23
шпала	0,254	0,408	0,509	0,611	0,713	0,815	1,019	1,222	1,426	1,631	1,83	2,037
баласт	4,692	7,508	9,384	11,26	13,14	15,015	18,77	22,52	26,28	30,03	33,78	37,54
супісок	2,671	4,274	5,342	6,410	7,479	8,547	10,68	12,82	14,96	17,10	19,23	21,37
великулам- кові	1,274	2,039	2,548	3,058	3,568	4,078	5,097	6,116	7,136	8,155	9,174	10,19
пісок	3,245	5,192	6,490	7,788	9,086	10,384	12,98	15,58	18,17	20,77	23,37	25,96
суглинок середній та важкий	3,674	5,879	7,349	8,818	10,29	11,758	14,70	17,64	20,58	23,52	26,46	29,40
суглинок легкий	2,641	4,225	5,281	6,337	7,393	8,450	10,56	12,66	14,79	16,90	19,01	21,12
глина	3,157	5,051	6,313	7,576	8,838	10,101	12,63	15,15	17,68	20,20	22,73	25,25

За результатами табл. 5.2 спостерігаємо, що зі збільшенням швидкості руху поїздів їх доля збільшується відносно швидкості розповсюдження хвиль в елементах колії. Але вона не суттєва (до 2%) для рейок і шпал та суттєва (до 38%) для шпальної основи та для прокладок (до 26%). Зважаючи на конструктивні параметри особливою деформативною роботи рейко-шпальної решітки є виконання транзитної функції в розповсюдженні коливань, а підшпальної основи – функцій накопичення та демпфірування коливань.

### 5.3. Врахування зв'язку між амплітудами коливань при переході хвиль з одного елемента в інший

#### 5.3.1. Вплив поодинокого вертикального навантаження.

Оскільки амплітуди коливань є залежними від фізичних характеристик елементів, та за законом збереження енергії пов'язані між собою, отже за фізико-

конструктивними характеристиками можливо дослідити як залежить коливання конструкції колії від коливань елементів колії. Значення та напрямок руху амплітуди коливань залежать від вектору сили, що їх викликають. На рис. 5.2 наведено співвідношення імпульсу сили коливань для вантажного вагону при різних швидкостях руху. За одиницю прийнято навантаження при швидкості руху 10 км/год.

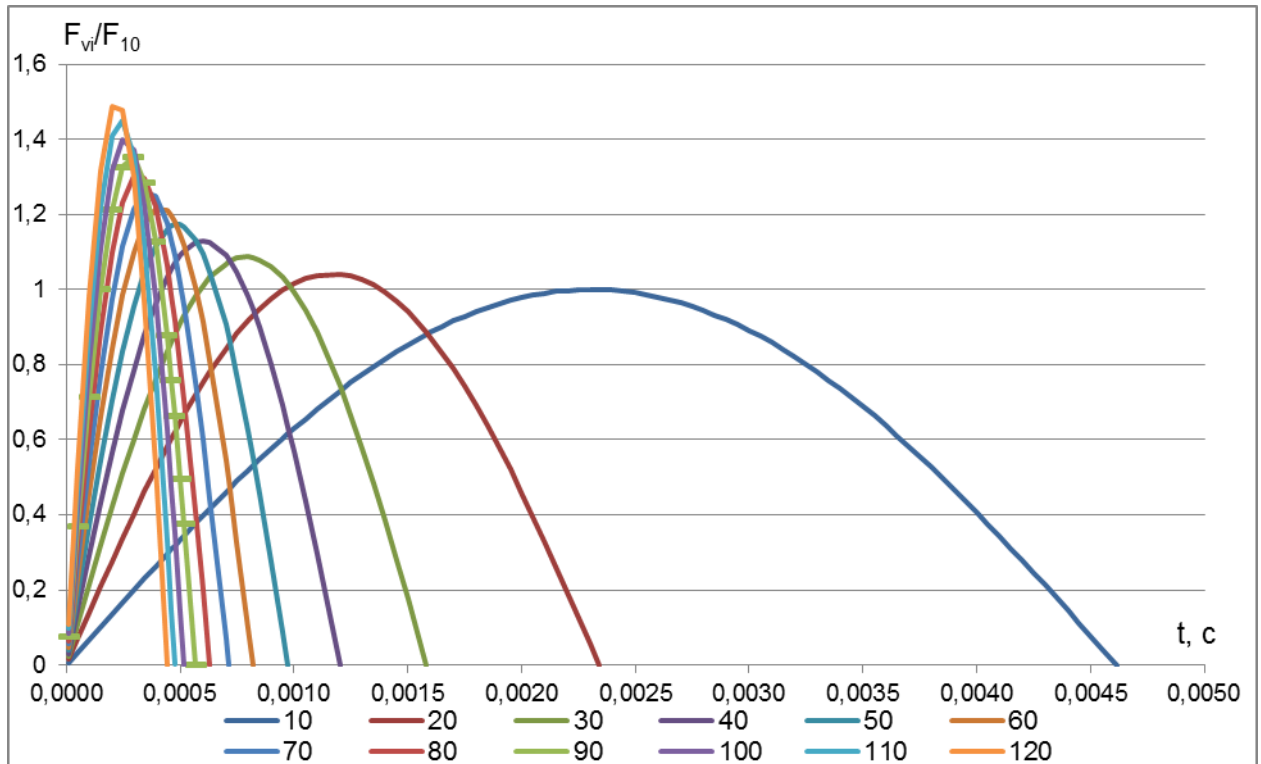


Рисунок 5.2 – Співвідношення імпульсу сили коливань в залежності від швидкості руху рухомого складу

За наведеними результатами рис. 5.2 спостерігаємо залежність при якій збільшення швидкості руху призводить до збільшення значення сили та зменшення часу дії сили, частоти імпульсу коливання та самого значення імпульсу коливання. Залежність між амплітудами вимушених коливань в рейках від швидкості руху, викликаними навантаженнями (рис. 5.2), наведено на рис. 5.3. За наведеними результатами рис. 5.3 спостерігаємо залежність при якій збільшення швидкості руху призводить до зменшення значень амплітуд в рейках за напрямком розповодження та зменшення часу реалізації цих амплітуд.

Загальні значення амплітуд формуються в процесі розповсюдження імпульсу коливання та є результатом суперпозиції всіх коливань.

Із закону збереження енергії інтенсивність заломленої хвилі дорівнює різниці інтенсивностей хвиль падіння та відбиття  $I_{пад} - I_{відб} = I_{залом}$ , таким чином:

$$A_{відб} = A_{пад} \frac{\rho_1 u_1 - \rho_2 u_2}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2}, \quad (5.9)$$

$$A_{залом} = A_{пад} \frac{2\rho_1 u_1}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2}, \quad (5.10)$$

де  $A_{відб}$ ,  $A_{пад}$ ,  $A_{залом}$  - амплітуди відповідно хвиль падіння, заломлення та відбиття;

$\rho_i u_i$  - імпеданс (опір середовища);

$u_i$  - швидкість хвилі.

За фізичною сутністю, амплітуда падіння це амплітуда, що визначає переміщення певної точки внутрішнього середовища в певний час від впливу зовнішнього навантаження  $F_{зовн}$  з урахуванням сил пружності та тертя середовища  $F_{внутр}$ . Амплітуда відбиття характеризує на скільки в кожній точці середовища в певний час зміниться переміщення певної точки внутрішнього середовища за рахунок реакції зовнішнього середовища  $F_{реакц}$ . Амплітуда заломлення є амплітудою падіння для іншого зовнішнього середовища. Отже надалі амплітуда заломлення характеризує імпульс сили зовнішнього навантаження, а амплітуда відбиття – імпульс сили реакції зовнішнього середовища, та для кожного об'єкту:

$$F_{зовн} = \sum F_{внутр} + \sum F_{реакц}. \quad (5.11)$$

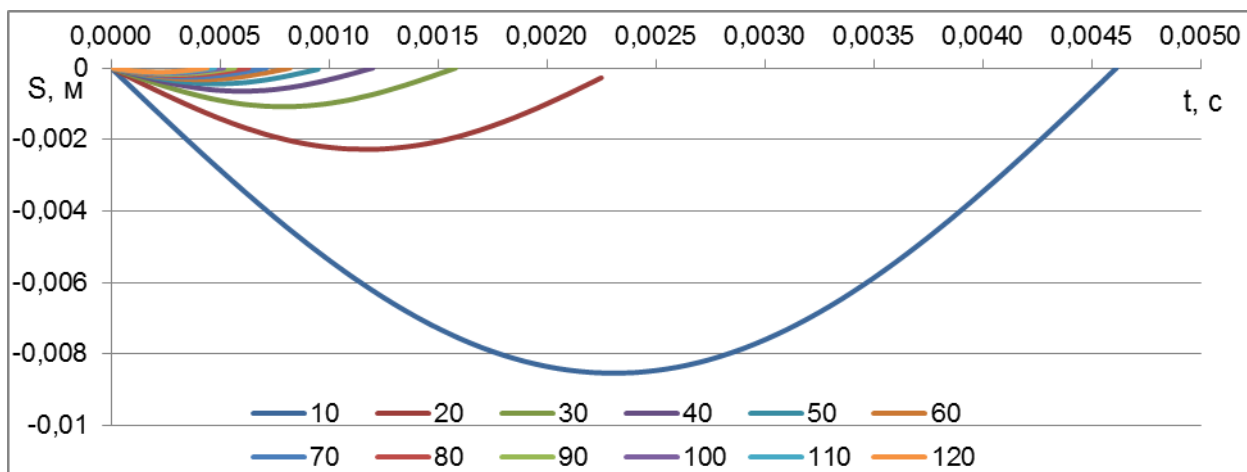


Рисунок 5.3 – Залежність амплітуд коливань навантаження в рейках від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

На рис. 5.4 та 5.5 наведено співвідношення сил, що діють в елементах конструкції колії при повному проходженні максимального значення сили рейки для прямого та оберненого процесів, тобто для сил зовнішнього навантаження та внутрішньої реакції.

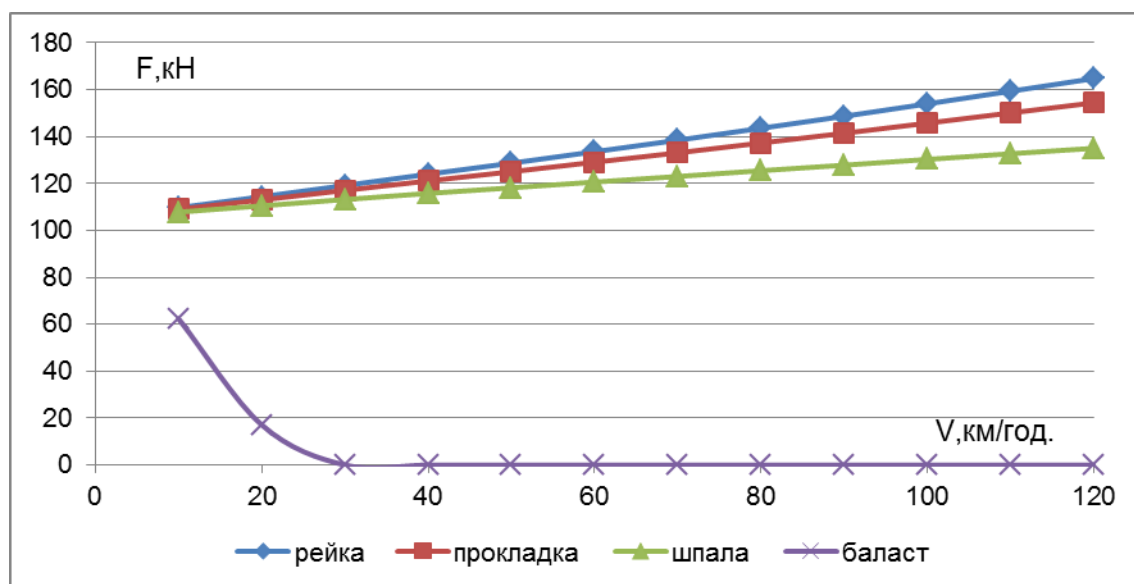


Рисунок 5.4 – Залежність одночасних значень сил навантаження в елементах колії від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

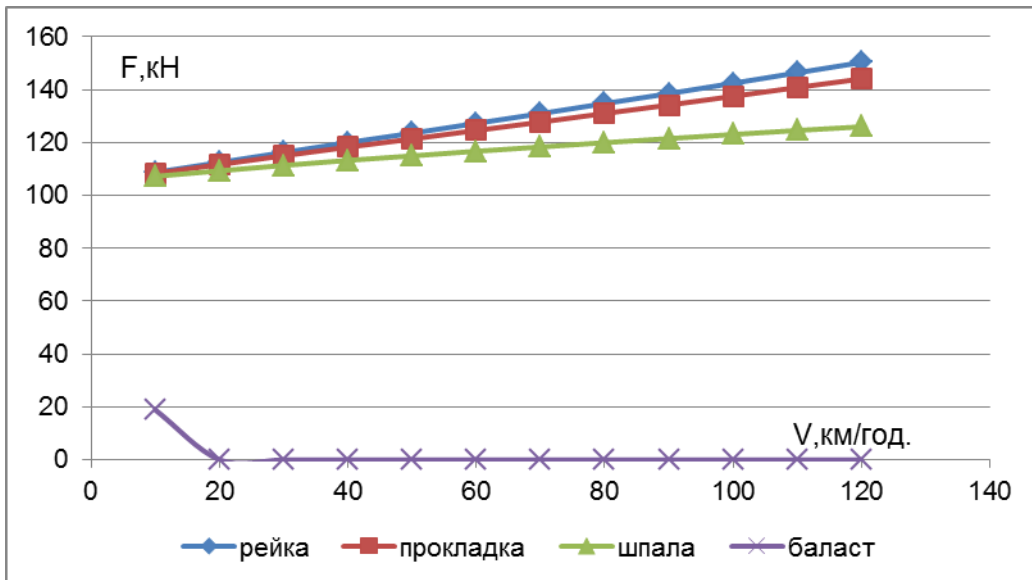


Рисунок 5.5 – Залежність одночасних значень сил реакцій в елементах колії від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

Час реакції конструкції колії на вплив рухомого складу залежить від його швидкості руху та фізико-конструктивних параметрів колії. Тобто необхідно чітко визначати, що мається на увазі під терміном «час затримки» між впливом навантаження та реакцією конструкції колії. Оскільки в квазідинамічних розрахунках ця різниця відсутня, за прийнятими теоретичними припущеннями, її намагаються врахувати як різницю між часом початку дії сили та часом реалізації максимального прогину рейки при деформації конструкції колії в вертикальній площині в перерізі прикладеного навантаження. Якщо розглядати задачу з таким визначенням терміну «час затримки», то по-перше, необхідно врахувати час, що витрачається на досягнення максимального значення сили в розглянутому перетині. По-друге, необхідно врахувати час сприймання імпульсу навантаження, враховуючи реакції на нього, елементів конструкції колії, за глибиною. Та по-третє, необхідно врахувати співвідношення часу сприймання імпульсу навантаження за глибиною та переміщенням самого навантаження по довжині рейки в цей час.

Результати першої умови були розглянуті в четвертому розділі та для вантажного вагону наведені в табл. Б 4.

Результати другої умови для тієї ж одиниці рухомого складу наведені на рис. 5.6...5.9. Залежності відображають результат коливання елементів колії в перетині центральної точки підошви рейки, що опирається на шпалу, при центральному впливі вертикальної сили.

Процес коливання прокладок від прямої дії сили в перетині починається на 0,032 мс пізніше від моменту прикладання імпульсу до рейки. Час початку процесу коливання прокладки не залежить від швидкості руху поїздів і визначається властивостями матеріалу та геометричними розмірами рейки. Час закінчення процесу коливання прокладки залежить від властивостей матеріалу і геометричних розмірів самої прокладки та від швидкості руху поїздів, оскільки перетин прокладки сприймає коливання при знаходженні сили на 2,18 м від нього в обидві сторони. Оскільки реакція прокладок залежить від їх товщини та властивостей матеріалу, то й існує затримка між роботою рейки та прокладок, у виді позитивних коливань на рис. 5.6. Час проходження силових хвиль прокладки менше за час дії сили в перетині, отже форма деформації прокладки не залежить від швидкості руху.

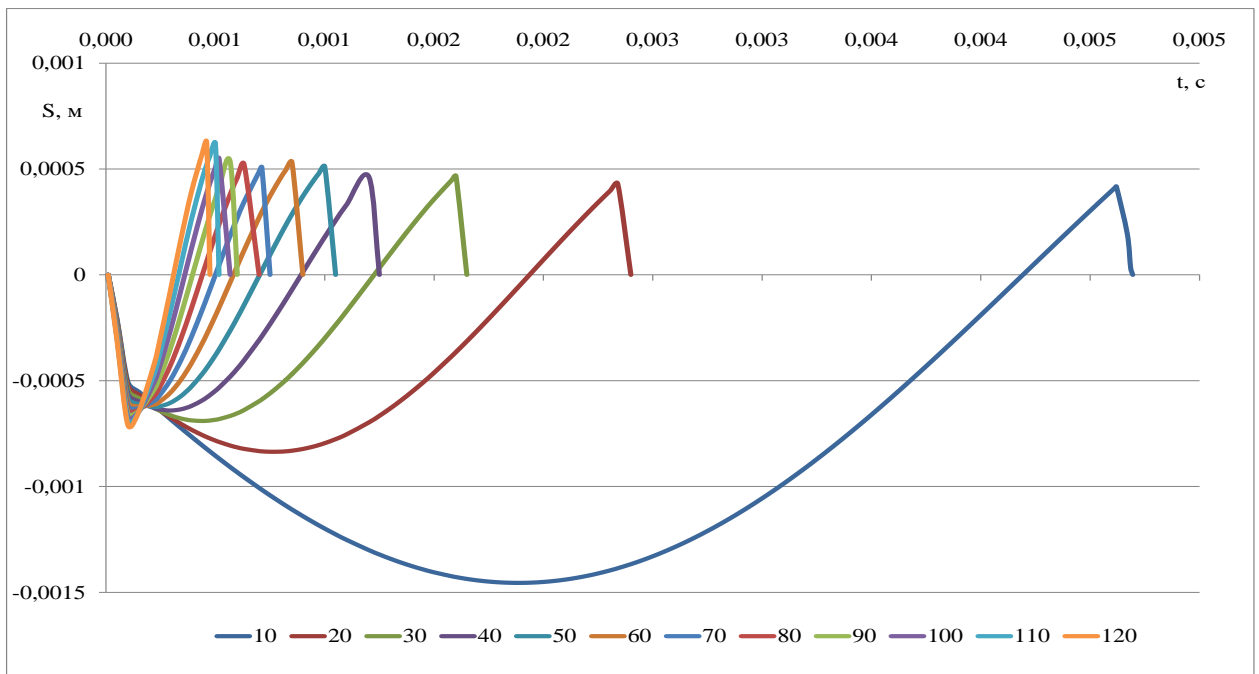


Рисунок 5.6 – Залежність амплітуд коливань навантажень в прокладках від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

Процес коливання шпал від прямої дії сили в перетині починається на 0,0738 мс пізніше від моменту прикладання імпульсу до рейки. Час роботи шпал щодо передавання навантаження на баласт залежить від швидкості руху поїздів та властивостей матеріалу і геометричних розмірів шпал, оскільки перетин шпали сприймає коливання при знаходженні сили на 1,64 м від нього в обидві сторони. Час роботи шпал щодо передавання навантаження на баласт наведено на рис. 5.7. Час проходження силових хвиль шпали менше за час дії сили в перетині, отже форма деформації її не залежить від швидкості руху.

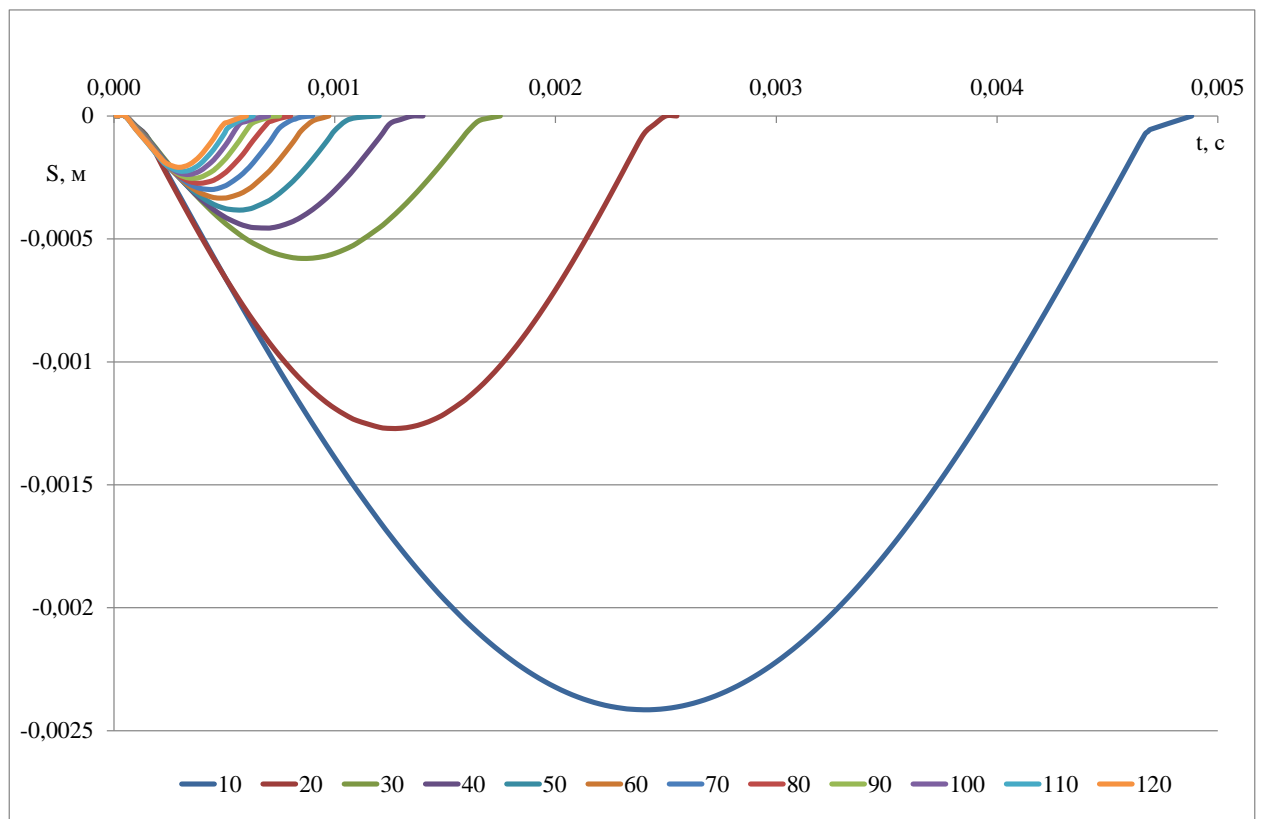


Рисунок 5.7 – Залежність амплітуд коливань навантажень в шпалах від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

Процес коливання баластного шару від прямої дії сили в перетині починається на 0,171575 мс пізніше від моменту прикладання імпульсу до рейки. Час роботи баласту щодо передавання навантаження на земляне полотно за напрямком становить 3...7 мс. Та залежить від швидкості руху поїздів, властивостей матеріалів баласту і земляного полотна та геометричних розмірів баласту, оскільки перетин сприймає навантаження, що знаходиться

на довжині не більше ніж 1,1 м від нього. При співвідношенні часу дії сили до часу розповсюдження силових хвиль в баластному шарі за напрямком розповсюдження в межах 0,5...1,2 амплітуди коливання баластного шару більші за амплітуди коливання земляного полотна. Час роботи баласту щодо передання навантаження на земляне полотно наведено на рис. 5.8. Час проходження силових хвиль баластного шару більше за час дії сили в перетині, отже форма деформації змінюється.

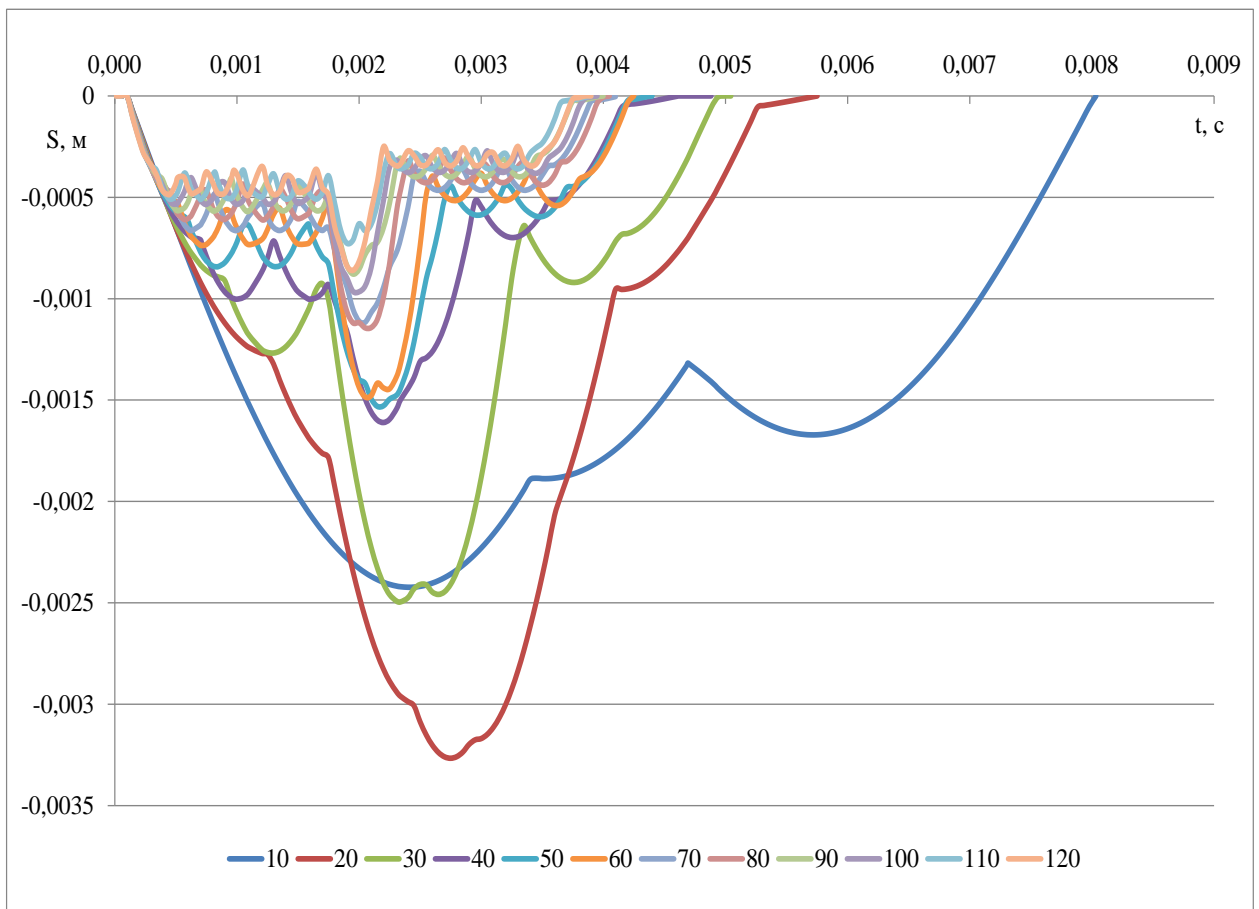


Рисунок 5.8 – Залежність амплітуд коливань навантажень в баластному шарі від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

Процес коливання земляного полотна від прямої дії сили в перетині починається на 3,479747 мс пізніше від моменту прикладання імпульсу до рейки. Час роботи земляного полотна залежить від швидкості руху поїздів, оскільки перетин виконує роботу при знаходженні сили на 0,63 м від нього в обидві сторони, величини амплітуди коливань, що надходять до нього, та властивостей матеріалу, оскільки вони визначають глибину сприймання

навантажень. На рис. 5.9 наведено результат коливання земляного полотна від дії навантажень рухомого складу. Час проходження силових хвиль земляного полотна більше за час дії сили в перетині, отже форма деформації залежить від швидкості руху

Залежність значень загальних амплітуд коливання конструкції колії від швидкостей руху наведено на рис. 5.10 – для швидкостей руху 10–60 км/год. та на рис. 5.11 – для швидкостей руху 70–120 м/год.

За результатами рис. 5.10 та 5.11, максимальні значення прогину конструкції не співпадають з дією максимальних значень навантажень рухомого складу. Та при дії рухомого складу на колію при будь-яких швидкостях руху максимальні значення амплітуди мають при сприйнятті навантажень земляним полотном та баластним шаром.

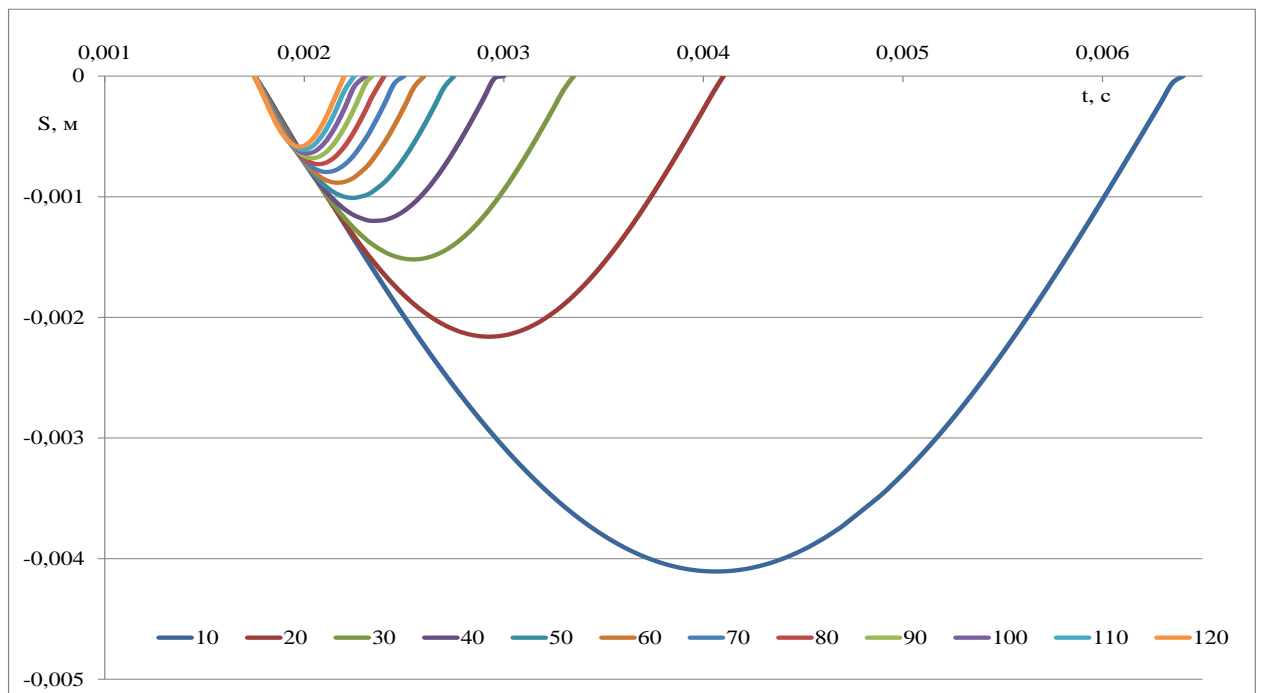


Рисунок 5.9 – Залежність амплітуд коливань навантажень в земляному полотні від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

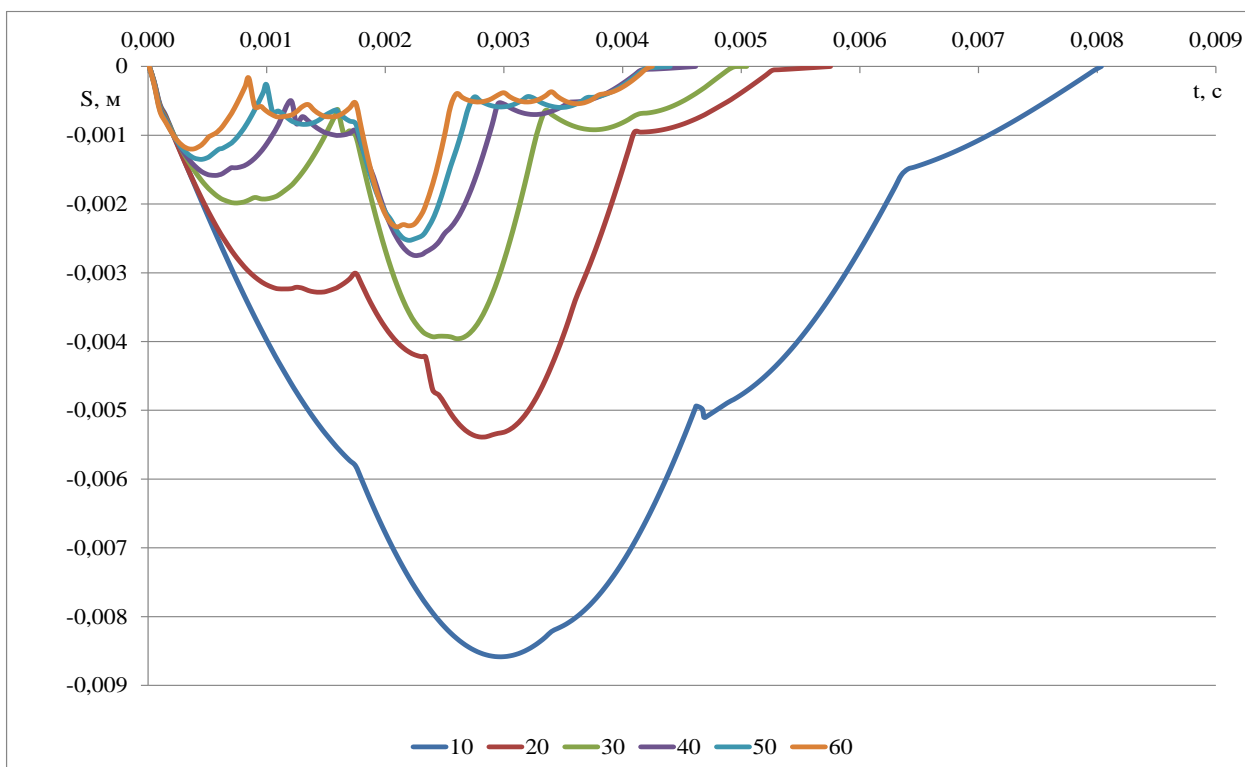


Рисунок 5.10 – Залежність амплітуд загальних коливань конструкції від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

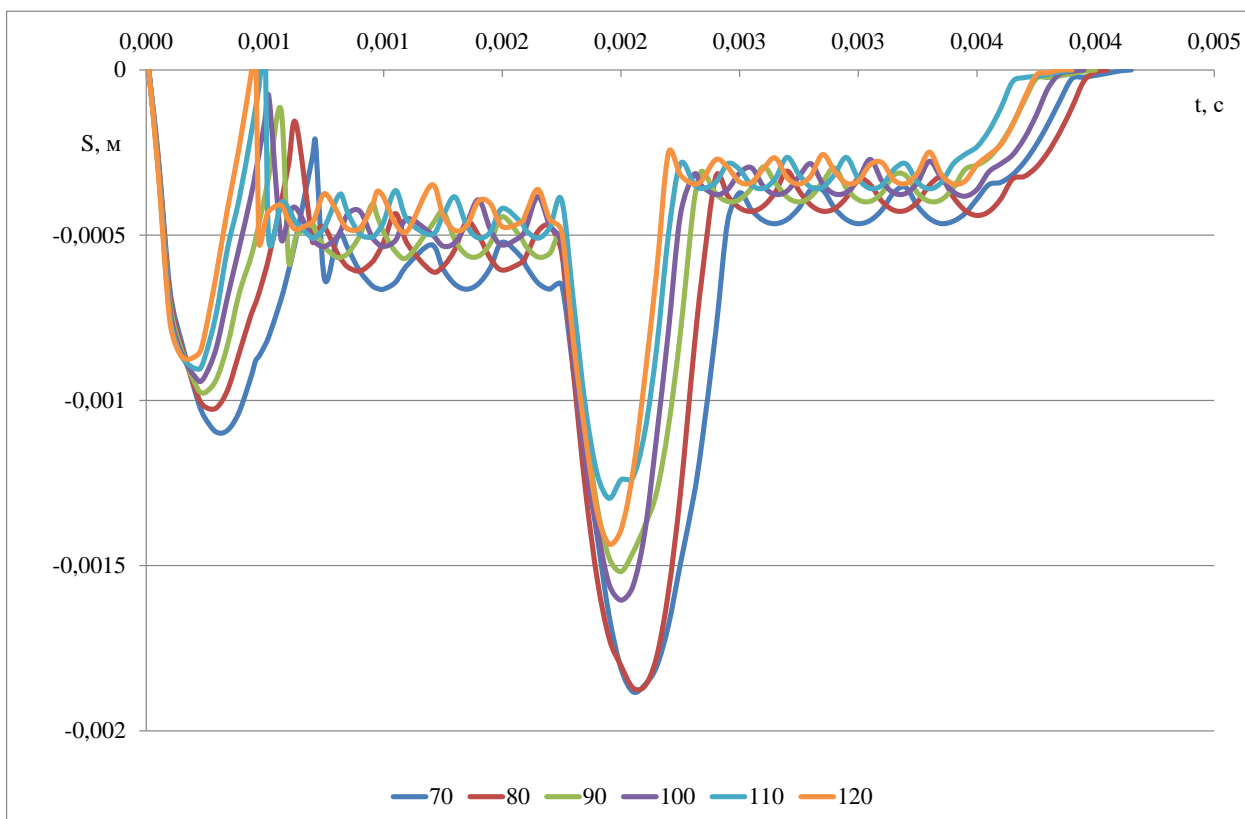


Рисунок 5.11 – Залежність амплітуд загальних коливань конструкції від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком

За наведеними результатами рис. 5.10, 5.11 спостерігаються залежності, при яких:

- збільшення швидкості руху призводить до зменшення значень амплітуд в рейках за напрямком розповсюдження та часу реалізації цих амплітуд за рахунок збільшення довжини контактної площадки, що сприймає імпульс навантаження. Час закінчення процесу коливання перетину рейки за напрямком залежить і від швидкості руху поїздів, і від властивостей та геометричних розмірів підрейкової основи та становить (1,74...8,85) часу безпосередньої дії сили за напрямком;

- імпульс, що діє на конструкцію колію, сприймається її елементами за напрямком розповсюдження в залежності від геометричних параметрів елементів та швидкостей їх деформації. Час впливу імпульсу в перетині колії зменшується зі збільшенням швидкості руху (рис. 5.2), а час передачі імпульсу силовими хвилями елементам конструкції колії залишається постійним для певної конструкції колії. Це призводить до того, що чим менше швидкість руху, тим більша за довжиною та глибиною частина конструкції колії, що задіяна силовими хвилями при розповсюдженні імпульсу навантаження. Але чим більша швидкість руху, тим більша довжина колії контактує з колесом за певний час. Та при цьому сприйняття навантажень всіма елементами конструкції колії за напрямком розповсюдження відбувається пізніше знаходження сили в перетині колії. Отже, співвідношення максимальних значень прогинів конструкції колії при різних швидкостях руху не відповідають співвідношенням максимальних значень сил при тих же швидкостях руху;

- за аналізом амплітуд коливань елементів окремо та конструкції колії в цілому, імпульс вимушених коливань викликає параметричні коливання як елементів, так і верхньої будови колії. Форма коливань за напрямком розповсюдження змінюється за часом розповсюдження та пов'язана зі співвідношенням часу дії сили та часом розповсюдження силових хвиль в елементах конструкції колії за напрямком розповсюдження. Так, при

швидкостях руху 70-120 км/год. форма коливань за час розповсюдження за напрямком однотипна. Відношення часу коливання конструкції колії від безпосередньої дії сили за напрямком до часу процесу коливання перетину за напрямком становить для 70 км/год. - 0,172, для 120 км/год. – 0,113, і складають від того ж співвідношення для 10 км/ год. відповідно 29,89% та 19,66%, та розкид за цими значеннями складає 10,23 %. Таким чином, спостерігається залежність, при якій, чим менше різниця між значеннями відношень часу коливань під впливом навантаження за напрямком до загального часу коливання за напрямком, тим більша однотипність форми коливань за напрямком в часі.

Оскільки навантаження на залізничну колію промислових підприємств більші за ті, що мають місце на магістральному транспорті було досліджено вплив збільшення сили на коливання конструкції колії магістральних підприємств. На рис 5.12...5.21 наведено характерні елементів та конструкції колії в цілому для різних навантажень.

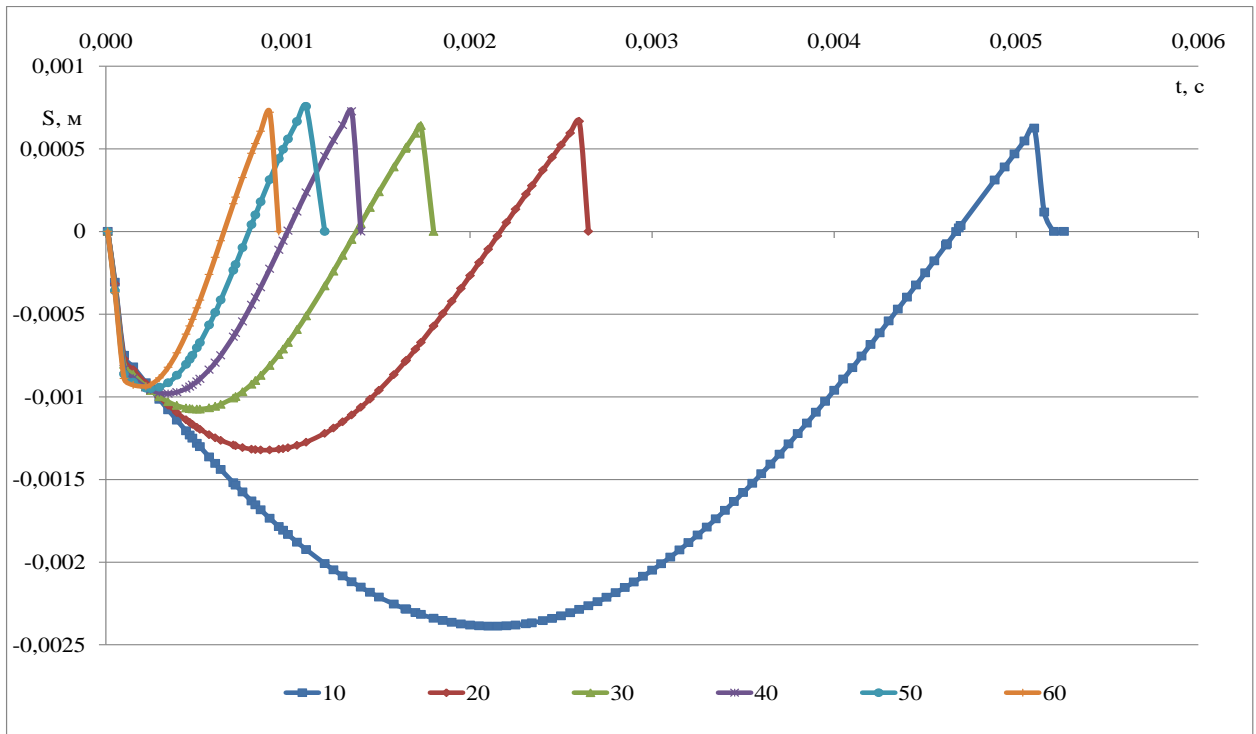


Рисунок 5.12 – Залежність амплітуд коливань навантажень прокладки від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 264-294 кН

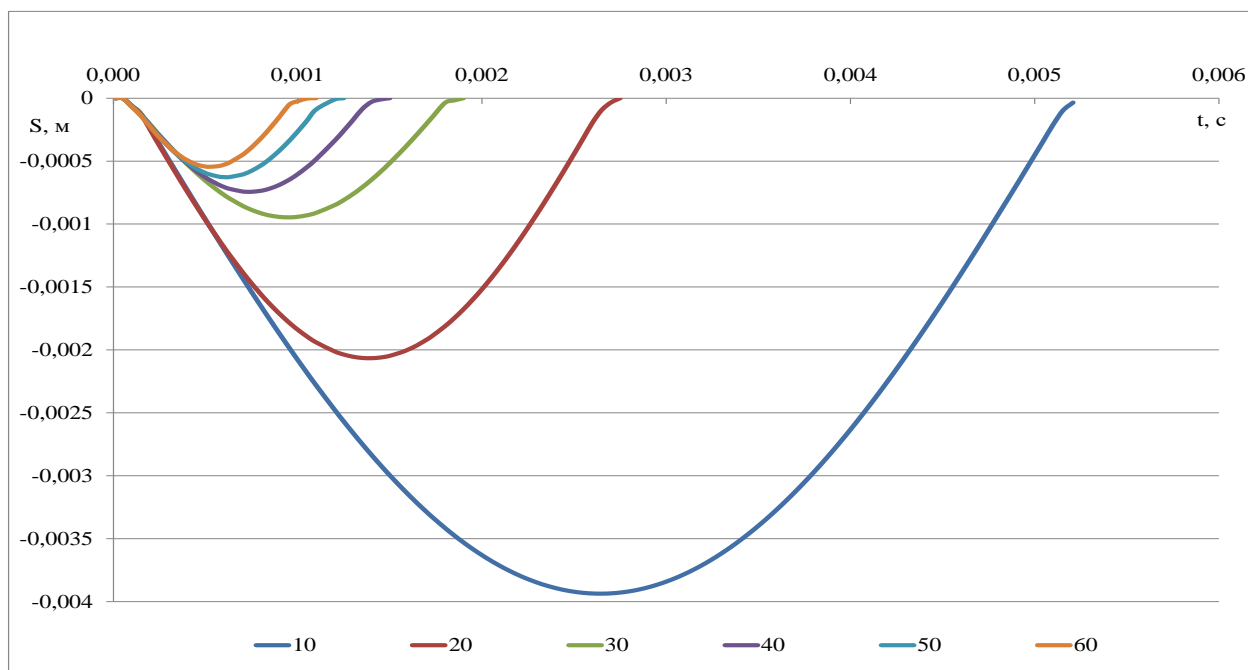


Рисунок 5.13 – Залежність амплітуд коливань навантажень шпали від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 264-294 кН

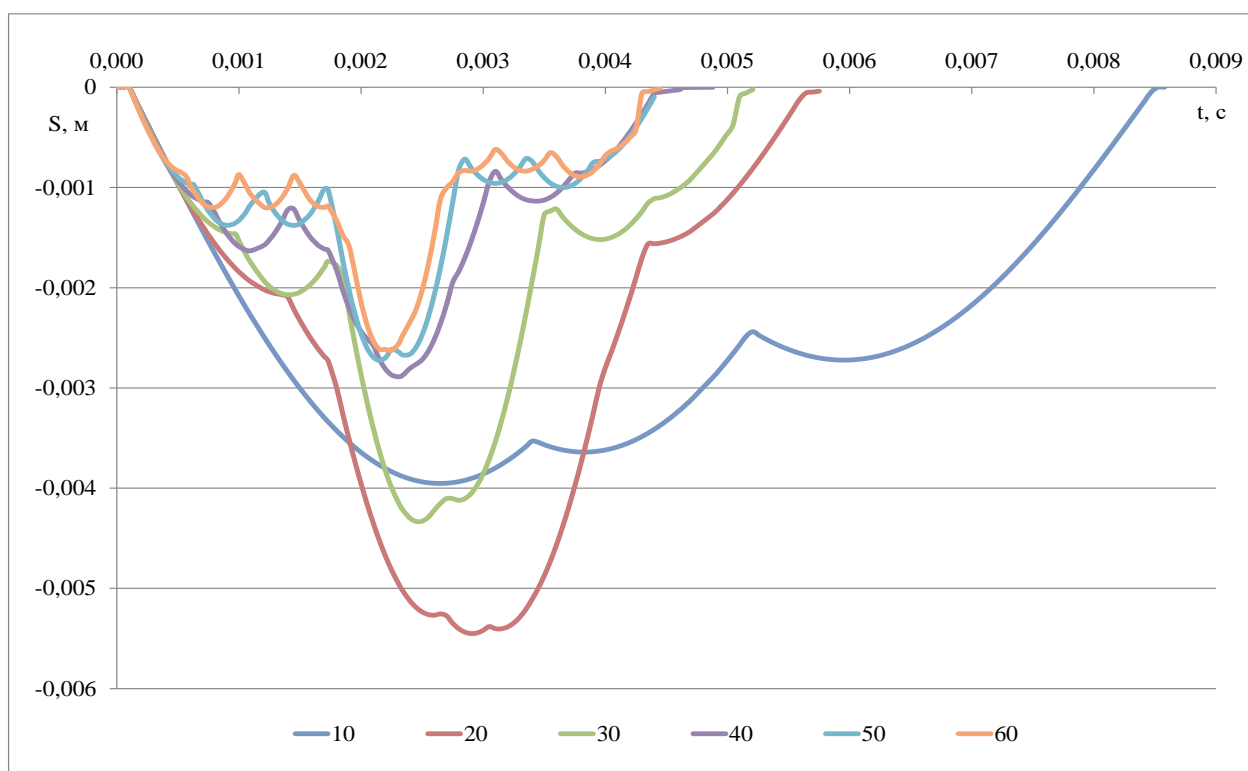


Рисунок 5.14 – Залежність амплітуд коливань навантажень баластного шару від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 264-294 кН

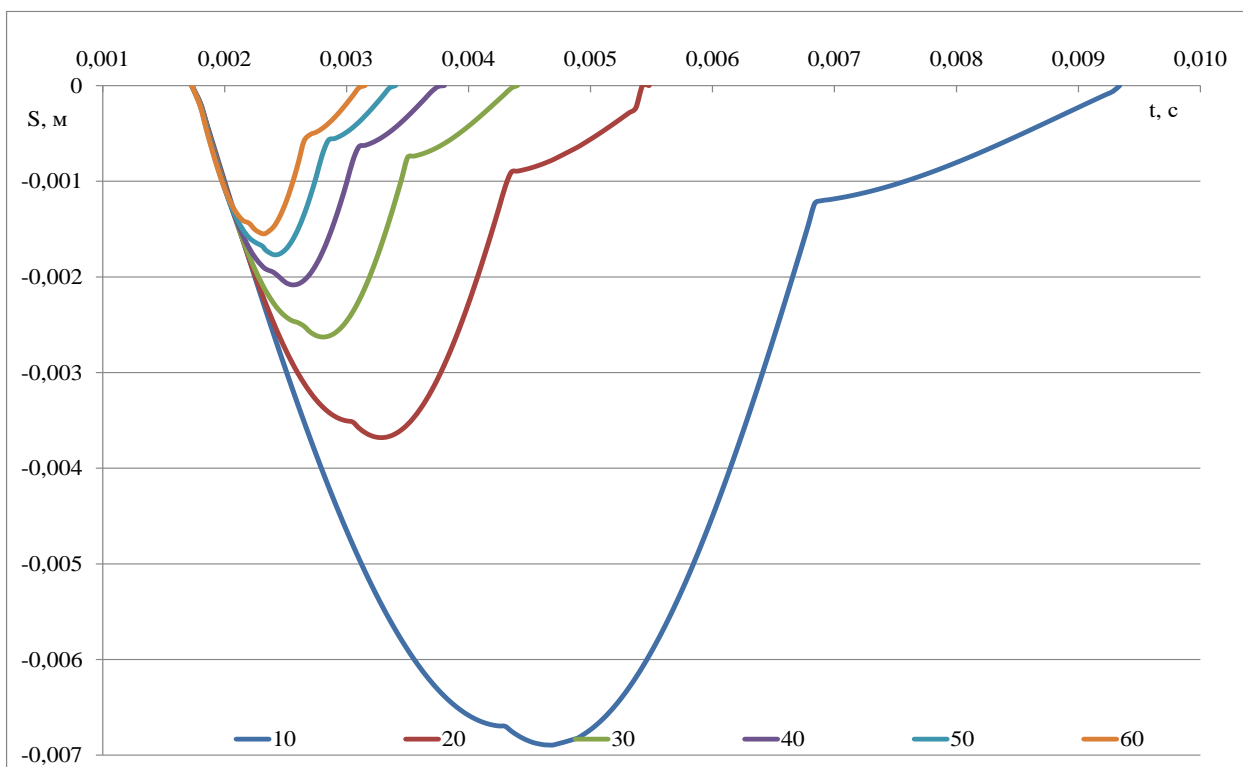


Рисунок 5.15 – Залежність амплітуд коливань навантажень земляного полотна від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 264-294 кН

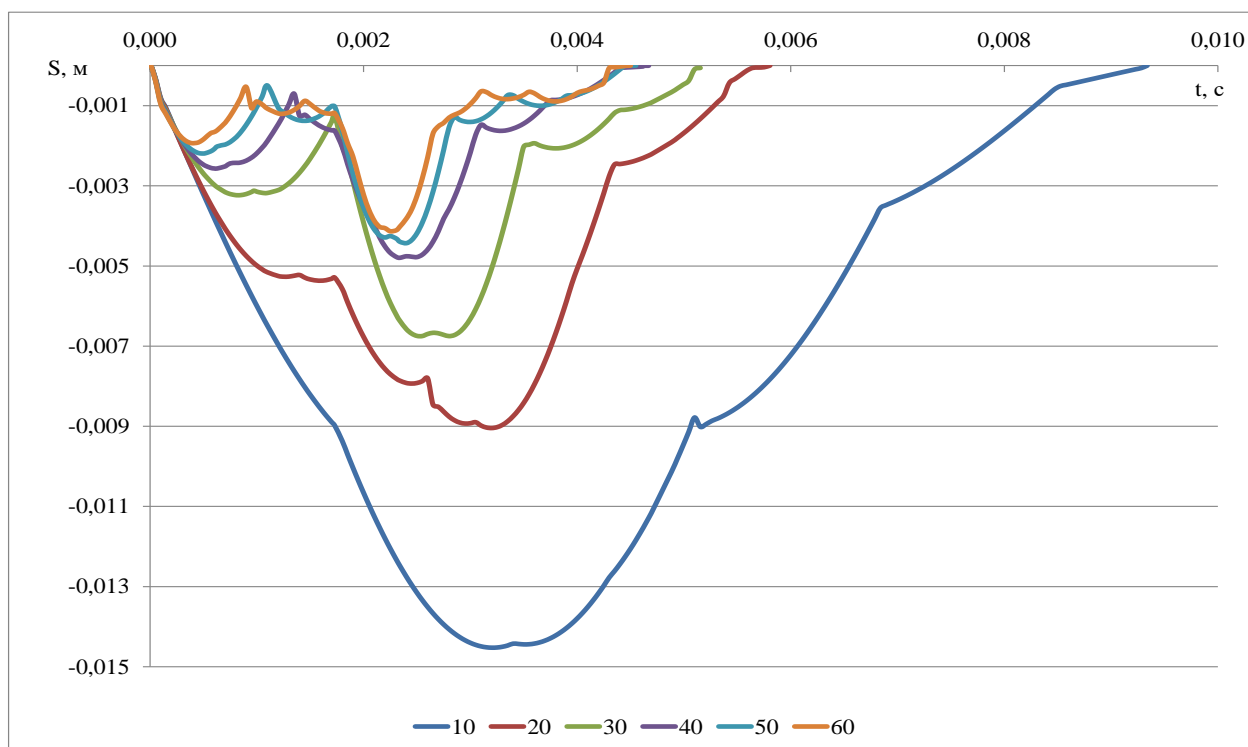


Рисунок 5.16 – Залежність амплітуд загальних коливань конструкції від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 264-294 кН

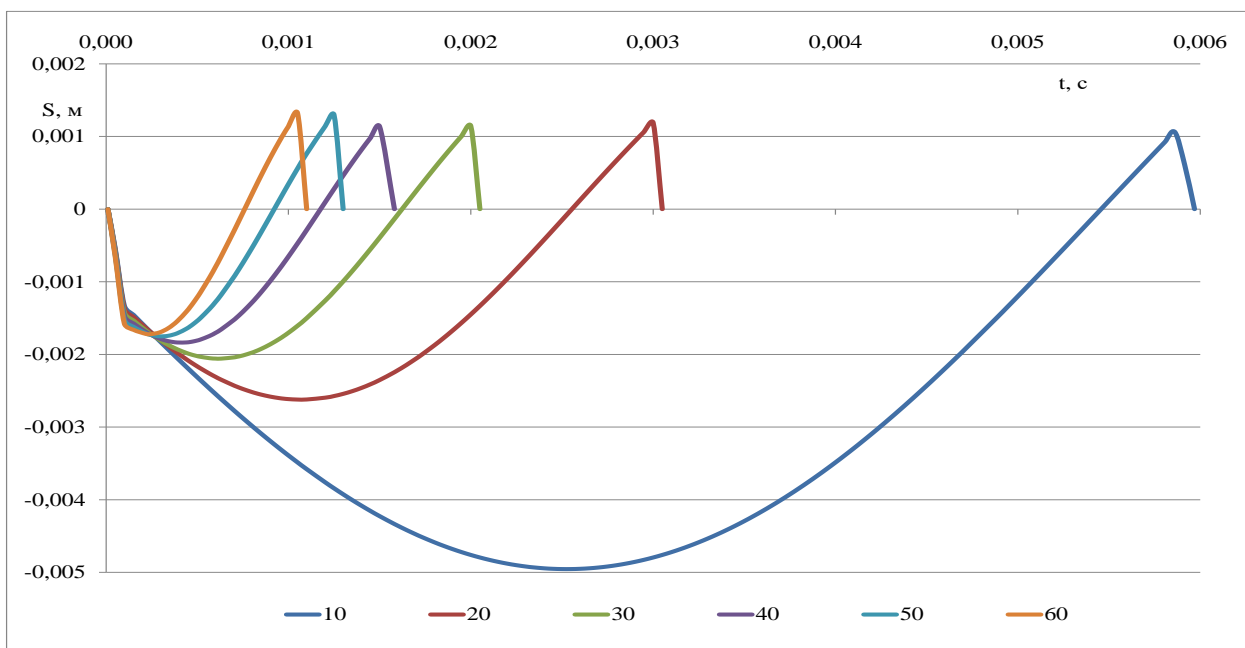


Рисунок 5.17 – Залежність амплітуд коливань навантажень прокладки від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 294-450 кН

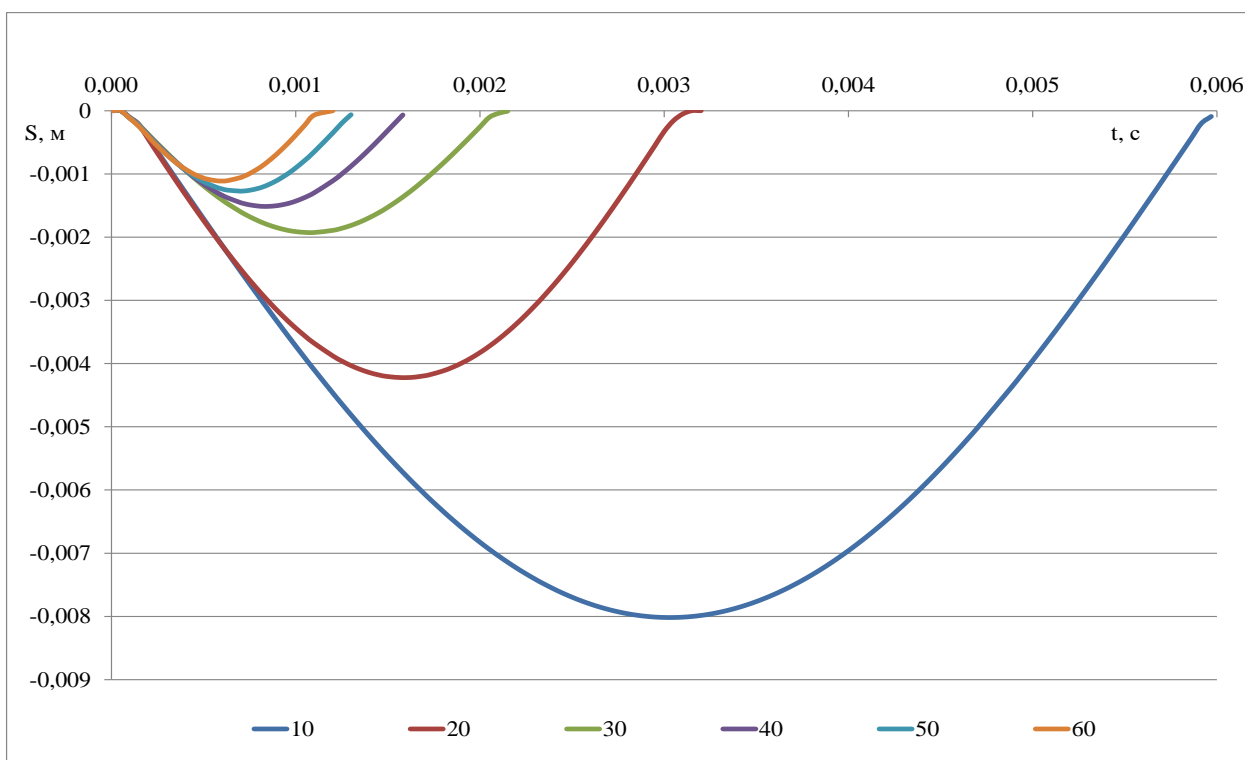


Рисунок 5.18 – Залежність амплітуд коливань навантажень шпали від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 294-450 кН

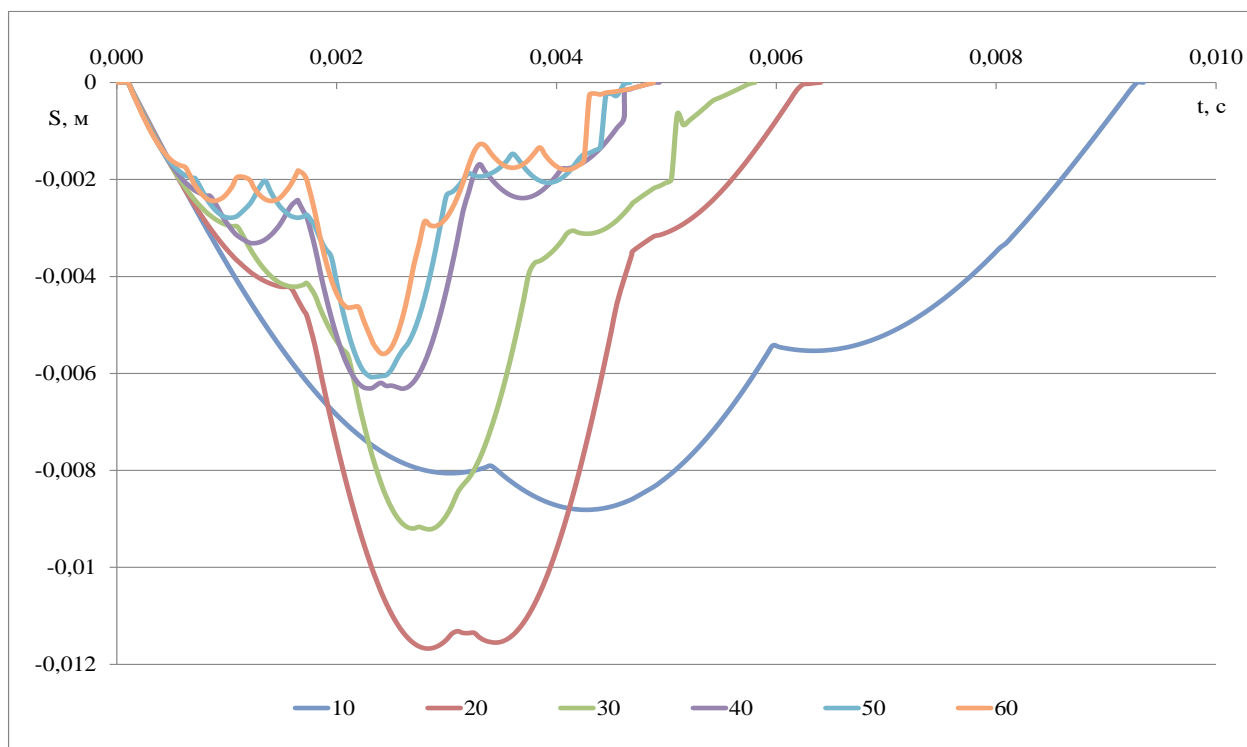


Рисунок 5.19 – Залежність амплітуд коливань навантажень баластного шару від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 294-450 кН

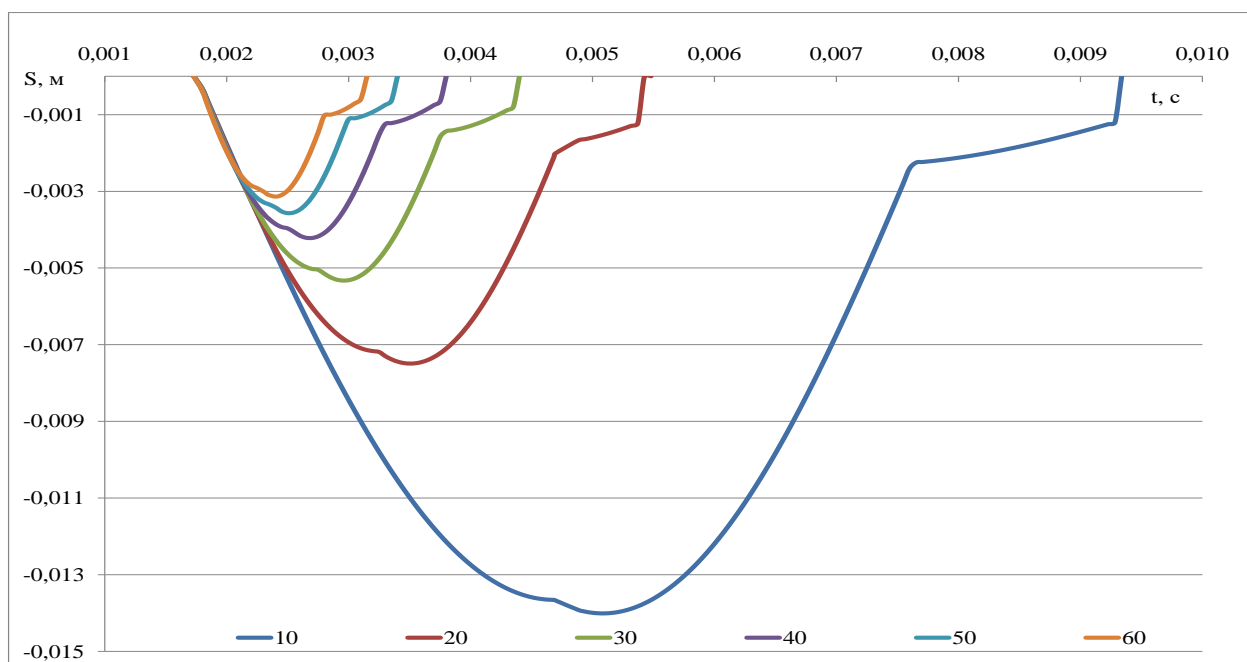


Рисунок 5.20 – Залежність амплітуд коливань навантажень земляного полотна від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 294-450 кН

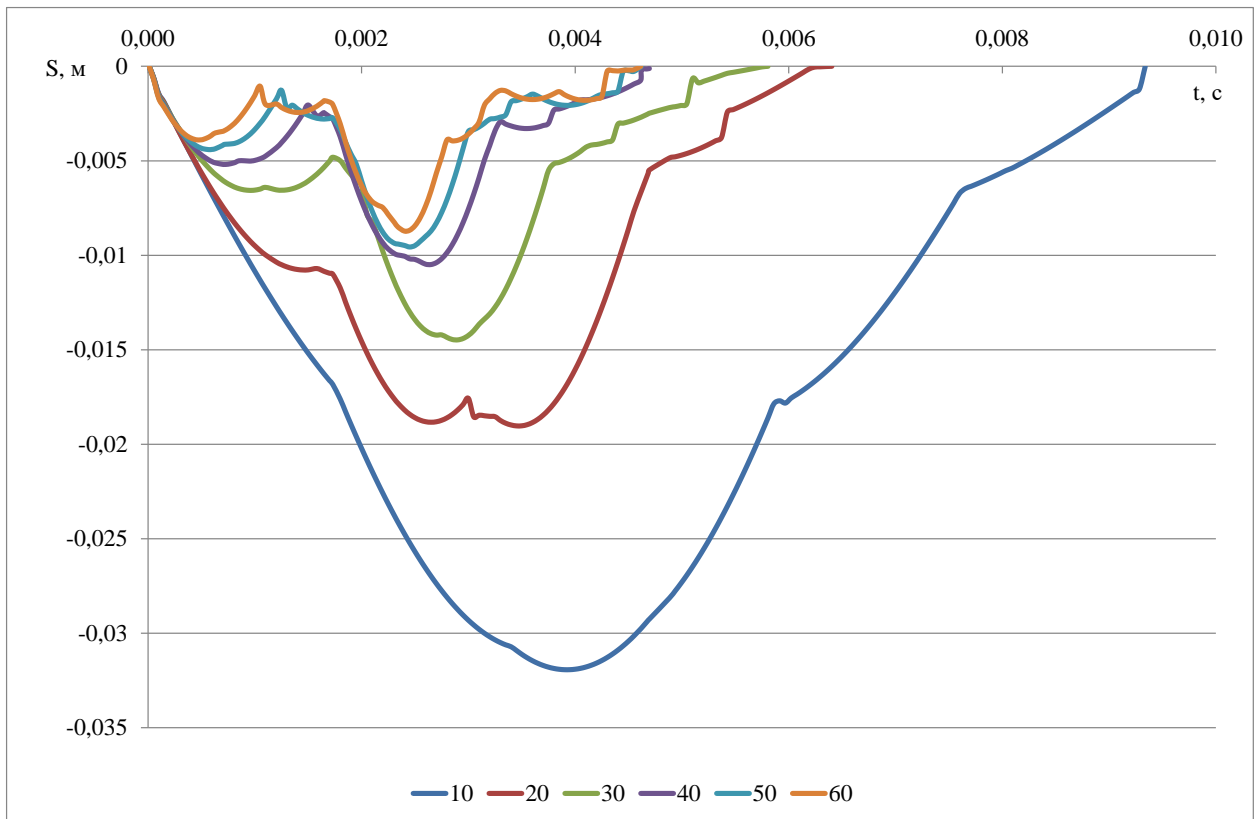


Рисунок 5.21 – Залежність амплітуд загальних коливань конструкції від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу за напрямком при осьових навантаженнях 294-450 кН

За результатами рис. 5.12...5.21 спостерігаються залежності, що подібні для навантажень поїздів магістрального транспорту, наведених на рис. 5.6...5.11, з характерною залежністю збільшення коливань елементів та конструкції колії при збільшенні навантажень. Виконання цієї залежності обумовлено характером перерозподілу силових хвиль при розповсюдженні за напрямком. Так, при сприйнятті навантажень прокладкою на шпалу передаються тільки поздовжні хвилі. Отже, прокладка формує передачу силових хвиль за напрямком як однотипний цикл відповідний певній швидкості руху поїздів. А розташування прокладок, відповідно епюрі шпал, формує цикл передачі навантажень від рейок.

Також слід наголосити не тільки про різну глибину сприйняття навантажень за часом, а й про різну довжину конструкції колії та рейки, що сприймають ці навантаження за часом. Навантаження, що діє на конструкцію колії, сприймається елементами її конструкції в залежності від будови

конструкції та швидкостей деформації самих елементів. Дія самого навантаження в перетині конструкції колії змінюється від нуля до максимального значення та навпаки за час контактування. Окрім того, час впливу навантаження в перетині колії зменшується зі збільшенням швидкості руху, а час передачі навантаження елементам конструкції колії залишається постійним для певної конструкції колії. Це призводить до того, що чим менше швидкість руху, тим більша за довжиною та глибиною частина конструкції колії задіяна для сприйняття навантаження. Але чим більша швидкість руху, тим більша довжина колії контактує з колесом за певний час. Та при цьому сприйняття навантажень всіма елементами конструкції колії відбувається значно пізніше знаходження сили в перетині колії. Отже співвідношення максимальних значень прогинів при різних швидкостях руху не відповідають співвідношенням максимальних значень сил при тих же швидкостях руху.

Швидкість руху на перегонах та станціях визначається, виходячи із стану, плану й профілю колії, конструктивних можливостей рухомого складу, маси поїздів, що обертаються, забезпечення їх гальмовими засобами, умов видимості, наявності перехрестя доріг, вимог, що стосуються переміщення технологічних вантажів і спеціального рухомого складу, та інших умов забезпечення безпеки руху. Та за [334] для вантажних поїздів не може бути більша за 90 км/год., а рефрижераторних – до 120 км/год.

При цьому за [372] швидкість руху на бокові колії стрілочними переводами із хрестовиною марки 1/11 і крутіше має бути не більшою 40 км/год., стрілочними переводами марки 1/9 не більше 25 км/год., стрілочними переводами із рейок типу Р-65 із хрестовиною марки 1/11 - не більше 50 км/год., симетричними стрілочними переводами з хрестовинами марки 1/11 - не більшою 70 км/год., стрілочними переводами з хрестовиною марки 1/18 - не більше 80 км/год.

Швидкість руху вагонами вперед та під час приймання на тупикові колії має бути не більшою 25 км/год. Швидкість руху на ділянці, де

вимагається її зменшення, має відповідати зазначеній у попередженні, а за відсутності вказівок, з якою швидкістю рухатися, - не більше 25 км/год.

Маневри можуть проводитися зі швидкістю не більше: 60 км/год. - у разі прямування по вільних коліях поодиноких локомотивів та локомотивів з вагонами, причепленими позаду, з увімкненими й випробуваними автогальмами; 40 км/год. - у разі прямування по вільних коліях поодиноких локомотивів та локомотивів з вагонами, причепленими позаду; 25 км/год. - у разі руху вагонами вперед по вільних коліях; 15 км/год. - у разі руху з вагонами, зайнятими людьми, а також з негабаритними вантажами бокової й нижньої негабаритності 4-го, 5-го та 6-го ступенів; 3 км/год. - у разі підходу локомотива (з вагонами або без них) до вагонів.

Отже, для залізничних колій промислових підприємств більш характерним є рух, для якого характер деформативної роботи колії наведено на рис. 5.16 та 5.21, а для магістральних залізничних колій – на рис. 5.10 та 5.11. Таким чином, основна різниця між характером деформативної роботи колії на промислових підприємствах та магістральних колій полягає в різному сприйнятті навантажень елементами колії. Це призводить до більших прогинів конструкції, навіть при однаковому навантаженні на неї, за рахунок участі меншої довжини колії, що сприймає навантаження. Для швидкостей руху менших за 40 км/год. (при товщині баластного шару 40 см - 12-33 км/год.), що притаманні промислового транспорту, основним елементом, який сприймає навантаження є баластний шар.

Для отримання результатів по третій умові, що стосується співвідношення часу сприймання імпульсу навантаження за глибиною та переміщенням самого навантаження по довжині рейки в цей час, враховано переміщення навантаження по довжині рейки, яке викликано декілька видів хвиль та є результатом суперпозиції дії цих хвиль за часом в розглянутій точці. Результати третьої умови для тієї ж одиниці рухомого складу наведені на рис. 5.12 та 5.13. Графічні залежності відображають результат коливання центральної точки підшви рейки, що опирається на опору, при

центральному впливі вертикальної сили при переміщенні, з врахуванням коливання підрейкової опори. На процес коливання впливають параметри діючих коливань, які не були розглянуті. В табл. 5.3 наведено характеристики коливань, які надають можливість оцінити процес коливання в цілому. Так в таблиці наведено результати стосовно:

- геометричного розташування опор, прийнято, що навантаження діє на опору №0; радіусу дії сили на кожному опорі;

- значення куту розташування шпали та тригонометричні функції, що характеризують частку коливального процесу, що діє на дану опору;

- часу досягнення коливанням певної шпали; швидкість розповсюдження до певної опори та вагу рейки, що задіяна певний час.

Отже, за результатами табл. 5.3 отримано, що вертикальне навантаження розподіляється між сім'ю опорами (3-2-1-0-1-2-3) інші опори сприймають горизонтальні навантаження.

Всі коливання, що розповсюджуються до опор при наближенні та віддаленні є змішані та за правилами Снелліуса при переході з одного елемента в інший викликають поздовжні та поперечні відбиті та заломлені коливання. Отже при досягненні хвилею розповсюдження граничних точок рейки, при переході в повітря, по поверхні рейки розповсюджуються поздовжні та (або) поперечні поверхневі хвилі з частотою вимушених коливань комбінація яких у залежності від кутів падіння при відбитті викликають появу інших видів хвиль.

Таблиця 5.3

### Характеристики коливань в елементах конструкції залізничної колії

N опори	Відстані за координатами, мм			r, мм	cos $\alpha$	sin $\alpha$	t, с	$\alpha$ , град.	u, м/с	m, кг
	x	y	z							
0	0	0	180	180	1	0	3,87E-05	0	5622,4	10,469
1	543,5	0	180	572,5	0,314393	0,9492928	0,000168	71,676	3401	71,259
2	1087	0	180	1101,8	0,163369	0,9865651	0,000332	80,598	3317,8	146,083
3	1630,5	0	180	1640,4	0,109729	0,9939615	0,000497	83,700	3301,6	219,494
4	2174	0	180	2181,4	0,082514	0,9965899	0,000662	85,267	3295,9	274,499
5	2717,5	0	180	2723,5	0,066093	0,9978135	0,000827	86,210	3293,3	366,137
6	3261	0	180	3265,96	0,055114	0,9984801	0,000992	86,841	3291,8	411,945
7	3804,5	0	180	3808,8	0,047259	0,9988826	0,001157	87,291	3290,9	492,967
8	4348	0	180	4351,7	0,041363	0,9991442	0,001323	87,629	3290,4	563,243
9	4891,5	0	180	4894,8	0,036774	0,9993236	0,001488	87,893	3290	633,535
10	5435	0	180	5437,97	0,033101	0,999452	0,001653	88,103	3289,7	703,837
11	5978,5	0	180	5981,2	0,030094	0,9995471	0,001818	88,276	3289,5	774,147
12	6522	0	180	6524,5	0,027589	0,9996194	0,001984	88,419	3289,4	844,463
13	7065,5	0	180	7067,8	0,025468	0,9996756	0,002149	88,541	3289,2	914,784
14	7609	0	180	7611,1	0,023650	0,9997203	0,002314	88,645	3289,1	985,108

Коли пружна хвиля падіння (пад) будь-якого типу (подовжнього - р або поперечного - s) зустрічає вільну поверхню по відношенню до зсуву границю, виникає чотири хвилі. Дві з них заломлюються (р-зал – заломлена подовжня хвиля з кутом заломлення  $\alpha$  та s – зал - поперечна заломлена хвиля з кутом заломлення  $\beta$ ) у нижнє середовище з щільністю  $\rho_b$  та дві відбиваються в верхньому середовищі з щільністю  $\rho_a$  (р-відб – подовжня хвиля відбиття та s –відб – поперечна хвиля відбиття). При цьому необхідними є чотири граничних умови, при яких по обидві сторони границі повинні співпадати нормальні і тангенціальні переміщення та напруження. Ці граничні умови будуть задовільнені, якщо до цих хвиль застосовано принцип Гюйгенса, що призводить до виконання законів Снелліуса. Отже, за допомогою рішення систем рівнянь (5.12, 5.13), отримано параметри коливання в вертикальній площині розглянутої точки. Співвідношення амплітуд хвильового процесу при падінні подовжньої хвилі визначаються як:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\left( A_{p-na\delta} - A_{p-ei\delta\delta} \right) \cos \alpha_{p-na\delta} + A_{s-ei\delta\delta} \sin \beta_{s-ei\delta\delta} - A_{p-3al} \cos \alpha_{p-3al} - A_{s-3al} \sin \beta_{s-3al} = 0; \\
\left( A_{p-na\delta} - A_{p-ei\delta\delta} \right) \sin \alpha_{p-na\delta} + A_{s-ei\delta\delta} \cos \beta_{s-ei\delta\delta} - A_{p-3al} \sin \alpha_{p-3al} + A_{s-3al} \cos \beta_{s-3al} = 0; \\
\left( A_{p-na\delta} + A_{p-ei\delta\delta} \right) c_{p-na\delta} \cos 2\beta_{s-ei\delta\delta} - A_{s-ei\delta\delta} c_{s-ei\delta\delta} \sin 2\beta_{s-ei\delta\delta} - \frac{\rho_b}{\rho_a} A_{p-3al} c_{p-3al} \cos 2\beta_{s-3al} - \\
-\frac{\rho_b}{\rho_a} A_{s-3al} c_{s-3al} \sin 2\beta_{s-3al} = 0; \\
\rho_a c_{s-ei\delta\delta}^2 \left[ \left( A_{p-na\delta} - A_{p-ei\delta\delta} \right) \sin 2\alpha_{p-na\delta} - \frac{c_{p-ei\delta\delta}}{c_{s-ei\delta\delta}} A_{s-ei\delta\delta} \cos 2\beta_{s-ei\delta\delta} \right] - \\
\rho_b c_{s-3al}^2 \left[ \frac{c_{p-ei\delta\delta}}{c_{s-ei\delta\delta}} A_{s-3al} \sin 2\alpha_{s-3al} - \frac{c_{p-ei\delta\delta}}{c_{s-3al}} A_{s-3al} \cos 2\beta_{s-3al} \right] = 0.
\end{array} \right. \quad (5.12)$$

Співвідношення амплітуд хвильового процесу при падінні поперечних хвиль вертикальної поляризації визначаються як:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\left( B_{s-na\delta} - B_{s-ei\delta\delta} \right) \sin \beta_{s-na\delta} + B_{p-ei\delta\delta} \cos \alpha_{p-ei\delta\delta} + B_{p-3al} \cos \alpha_{p-3al} - B_{s-3al} \sin \beta_{s-3al} = 0; \\
\left( B_{s-na\delta} + B_{s-ei\delta\delta} \right) \cos \beta_{s-na\delta} + B_{p-ei\delta\delta} \sin \alpha_{p-ei\delta\delta} - B_{p-3al} \sin \alpha_{p-3al} - B_{s-3al} \cos \beta_{s-3al} = 0; \\
\left( B_{s-na\delta} + B_{s-ei\delta\delta} \right) c_{s-na\delta} \sin 2\beta_{s-na\delta} - B_{p-ei\delta\delta} c_{p-ei\delta\delta} \cos 2\beta_{s-ei\delta\delta} + \frac{\rho_b}{\rho_a} B_{p-3al} c_{p-3al} \cos 2\beta_{s-3al} - \\
-\frac{\rho_b}{\rho_a} B_{s-3al} c_{s-3al} \sin 2\beta_{s-3al} = 0; \\
\rho_a c_{s-ei\delta\delta} \left[ \left( B_{s-na\delta} - B_{s-ei\delta\delta} \right) \cos 2\beta_{s-na\delta} - \frac{c_{s-ei\delta\delta}}{c_{p-ei\delta\delta}} B_{p-ei\delta\delta} \sin 2\alpha_{p-ei\delta\delta} \right] - \\
\rho_b c_{s-3al} \left[ \frac{c_{s-3al}}{c_{p-3al}} B_{p-3al} \sin 2\alpha_{p-3al} + B_{s-3al} \cos 2\beta_{s-3al} \right] = 0.
\end{array} \right. \quad (5.13)$$

Співвідношення амплітуд хвильового процесу при падінні поперечних хвиль горизонтальної поляризації визначаються як:

$$\left\{ \begin{array}{l}
B_{s-na\delta} + B_{s-ei\delta\delta} - B_{s-3al} = 0; \\
\rho_a \left( B_{s-na\delta} - B_{s-ei\delta\delta} \right) \sin 2\beta_{s-na\delta} - \rho_b B_{s-3al} \sin 2\beta_{s-3al} = 0.
\end{array} \right. \quad (5.14)$$

Що стосується розглянутої точки, яка розташована на поверхні підшви рейки, то вона відчуватиме дію різних хвиль, та коливатиметься в вертикальній площині з амплітудою, що є сумою коливань. Характеристики кутів хвильового процесу наведено в табл. 5.4 та 5.5.

Таблиця 5.4

**Характеристики кутів хвильового процесу в контактних парах рейки з повітрям та прокладками при дії поздовжніх хвиль**

Контактні пари	Кути, градус							
	падіння	відбиття		заломлення		критичні		
		$\rho_I$	$s_I$	$\rho_{II}$	$s_{II}$	I	II	III
Рейка - повітря	10	10	5,33-5,83	0,57-0,61	-	-	-	-
	20	20	10,53-11,54	1,12-1,20	-			
	30	30	15,50-17,00	1,64-1,75	-			
	40	40	20,10-22,08	2,10-2,25	-			
	50	50	24,17-26,62	2,51-2,68	-			
	60	60	27,58-30,43	2,83-3,03	-			
	70	70	30,15-33,34	3,07-3,29	-			
	80	80	31,76-35,17	3,22-3,44	-			
Рейка - прокладка	10	10	5,33-5,83	0,68-2,788	0,34-0,47	-	-	-
	20	20	10,53-11,54	1,33-5,49	0,67-0,94			
	30	30	15,50-17,00	1,95-8,04	0,98-1,37			
	40	40	20,10-22,08	2,51-10,36	1,25-1,76			
	50	50	24,17-26,62	2,9-12,379	1,50-2,10			
	60	60	27,58-30,43	3,38-14,02	1,69-2,37			
	70	70	30,15-33,34	3,67-15,24	1,83-2,57			
	80	80	31,76-35,17	3,85-15,99	1,92-2,69			

За результатами табл. 5.4 при прямій передачі навантажень через рейки в повітрі виникають тільки поздовжні хвилі, а в прокладці як поздовжні так і поперечні хвилі. При коливанні кутів падіння від 10<sup>0</sup> до 80<sup>0</sup> значення кутів поздовжніх хвиль заломлення в повітрі сягають 0,57...3,44<sup>0</sup>, а в прокладці 0,6...15,99<sup>0</sup> та значення кутів поперечних хвиль заломлення в прокладці сягають 0,34...2,69<sup>0</sup>. Отже в обох випадках кути мають малі значення та передають в вертикальну площину відповідно 0,99995...0,998198, 0,999945...0,961309 та 0,005934...0,046932 від значень амплітуд заломленого процесу коливання.

Таблиця 5.5

**Характеристики кутів хвильового процесу в контактних парах рейки з повітрям та прокладками при дії поперечних хвиль**

Контактні пари	Кути, град.							
	падіння	відбиття		заломлення		критичні		
		$s_I$	$p_I$	$p_{II}$	$s_{II}$	I	II	III
Рейка - повітря	10	10	17,27-18,96	1,04-1,06	-	-	-	32,3 - 35,8
	20	20	35,79-39,78	2,04-2,09	-			
	30	30	58,74-69,30	2,99-3,06	-			
	40	40	-	3,47-3,56	-			
	50	50	-	4,58-4,69	-			
	60	60	-	5,18-5,31	-			
	70	70	-	5,62-5,76	-			
	80	80	-	5,90-6,04	-			
Рейка - прокладка	10	10	17,27-18,96	1,16-4,88	0,62-0,83	-	-	32,3 - 35,8
	20	20	35,79-39,78	2,28-9,64	1,22-1,64			
	30	30	58,74-69,30	3,3-14,174	1,78-2,39			
	40	40	-	3,88-16,52	2,07-2,78			
	50	50	-	5,12-22,03	2,73-3,67			
	60	60	-	5,79-25,09	3,09-4,15			
	70	70	-	6,28-27,39	3,35-4,50			
	80	80	-	6,58-28,83	3,51-4,72			

Результати табл. 5.5 подібні результатам табл. 5.4, але значення кутів заломлення дещо більші, отже передають в вертикальну площину відповідно 0,999825...0,994449, 0,876054...0,999795 та 0,010821...0,082286 від значень амплітуд заломленого процесу коливання.

Результати табл. 5.4 та 5.5 доводять, що в прокладці мають місце змішані хвилі, що створені поздовжніми хвилями, які є часткою заломленого процесу коливань проходження поздовжніх хвиль з рейки в прокладку та поперечними хвилями, які є часткою заломленого процесу коливань проходження поперечних хвиль з рейки в прокладку.

За результатами табл. 5.5 в обох контактних парах по поверхні рейки в розглянутій площині виникають головні хвилі при падінні поперечних хвиль

під III критичними кутами, тобто при наближенні сили на 0,11-0,13 м до розглянутого перетину.

Оскільки швидкість поздовжніх хвиль в прокладці менша за швидкість аналогічних хвиль у рейці, отже по поверхні рейки в розглянутій площині виникають головні хвилі при падінні поздовжніх хвиль оберненого хвильового процесу з прокладки в рейку під I критичними кутами (0,068-0,265 0). Та при кутах більших ніж I критичні в рейку проходять тільки поперечні хвилі. А якщо кути падіння оберненого процесу набудуть значень II критичного куту (0,117-0,5110) по поверхні рейки в розглянутій площині виникають хвилі Релея.

Отже в розглянутій точці площині виникають поздовжні, поперечні, квазісферичні, головні та хвилі Релея. В вертикальній площині мають вплив тільки поздовжні та хвилі Релея.

Для більшого розуміння процесу в табл. 5.6 та 5.7 наведено коефіцієнти відбиття та заломлення в розглянутій парі рейка-прокладка згідно співвідношення амплітуд за (5.12, 5.13).

Таблиця 5.6

**Коефіцієнти відбиття та заломлення хвильового процесу в контактній парі рейки з прокладками при дії поздовжніх хвиль**

$K_{p-над}$	$K_{p-відб}$	$K_{s-відб}$	$K_{p-зал}$	$K_{s-зал}$
10	-0,941	0,392	1,950	-0,380
20	-0,820	0,727	1,852	-0,732
30	-0,646	0,963	1,701	-1,047
40	-0,450	1,081	1,512	-1,302
50	-0,272	1,085	1,302	-1,482
60	-0,148	0,997	1,083	-1,558
70	-0,131	0,835	0,855	-1,485
80	-0,318	0,573	0,569	-1,120

Таблиця 5.6

**Коефіцієнти відбиття та заломлення хвильового процесу в контактній парі рейки з прокладками при дії поперечних хвиль**

$K_{p-пад}$	$K_{p-відб}$	$K_{s-відб}$	$K_{p-зал}$	$K_{s-зал}$
10	0,847	0,389	-0,378	1,943
20	0,467	0,712	-0,722	1,824
30	-0,029	0,968	-0,965	1,725
40	0,708	5,656	0,064	6,964
50	0,799	-5,960	-0,383	-4,774

Результати табл. 5.5 та 5.6 доводять, що в залежності від куту падіння для одного і того ж матеріалу змінюються співвідношення величин амплітуд відбиття та заломлення. Оскільки величина енергії, що переноситься хвилею пропорційна квадрату амплітуд, то й співвідношення величин енергії у відбитих та заломлених хвилях різні при різних кутах падіння. Цей факт надає можливість спрямованого прогнозування процесу деформативності залізничної колії шляхом зміни характеристик матеріалів та конструкції елементів залізничної колії за рахунок вивчення процесу виникнення та розповсюдження силових хвиль.

Результати загального коливання розглянутої точки від впливу вертикальних вимушених сил наведено на рис. 5.12 та 5.13.

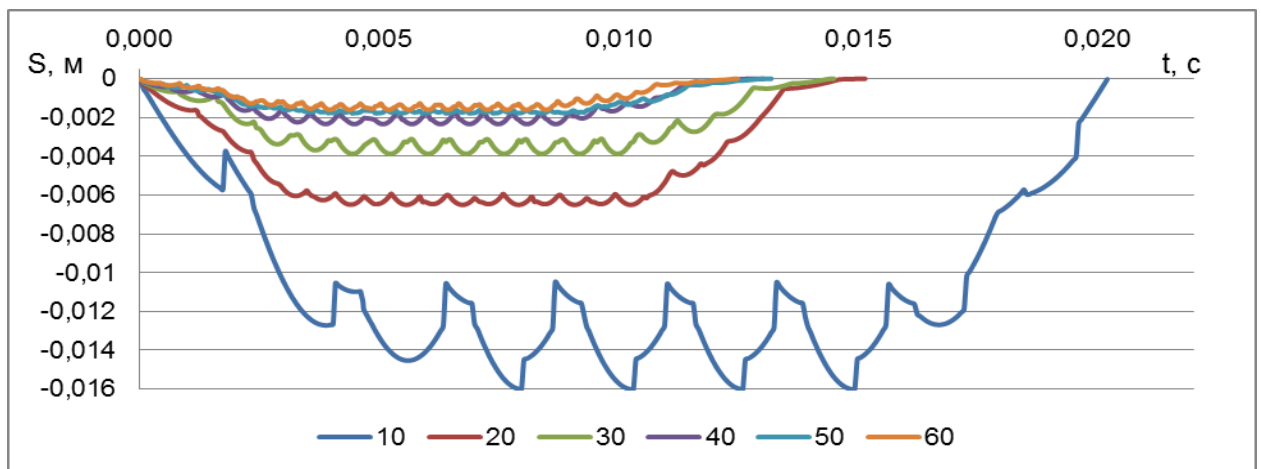


Рисунок 5.12 – Залежність амплітуд загальних коливань верхньої будови конструкції колії під дією вимушених сил від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу одній площадці

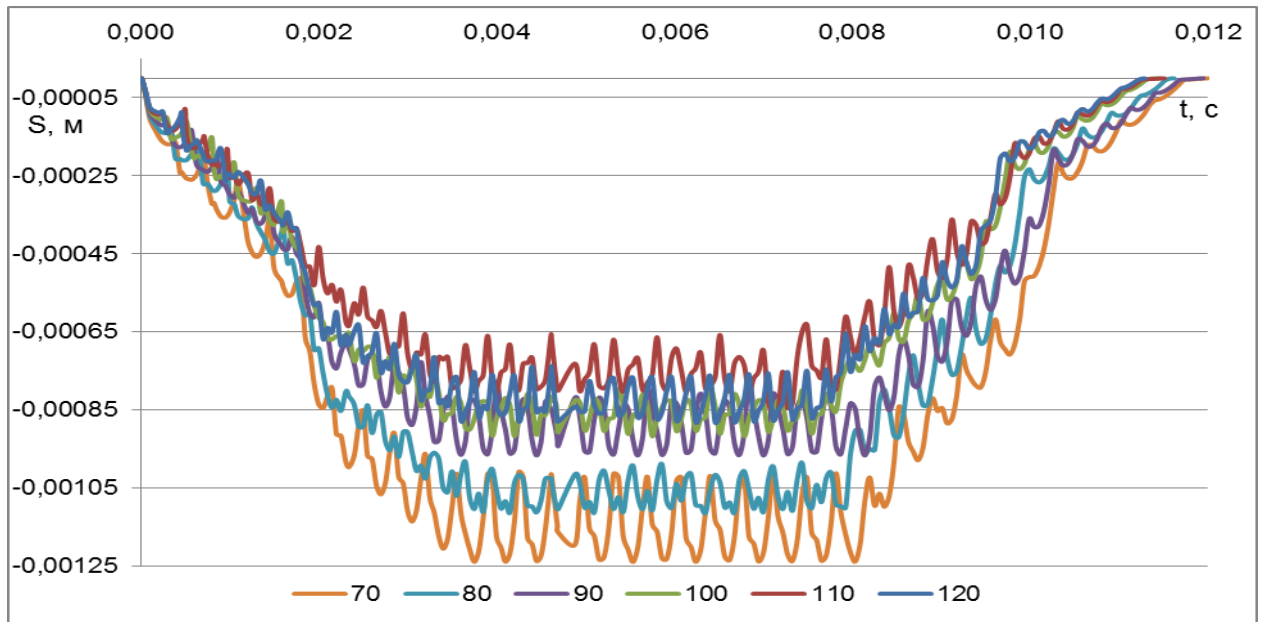


Рисунок 5.13 – Залежність амплітуд загальних коливань верхньої будови конструкції колії під дією сил від швидкості рухомого складу при передачі імпульсу одній площадці

За результатами рис. 5.12 та 5.13, максимальні значення навантажень рухомого складу співпадають за часом з початком реалізації максимальних значень прогину конструкції. При дії рухомого складу на колію при будь-яких швидкостях руху максимальні значення амплітуди мають місце при сприйнятті навантажень земляним полотном від баластного шару. Величини діючого навантаження спочатку сприймає рейко-шпальна решітка. Величини вертикальних прогинів від деформативності рейко-шпальної решітки у 1,52...1,81 разів менше ніж величини максимальних прогинів від деформативності всієї конструкції колії при поодинокому навантаженні колії. Але з врахуванням суперпозиції впливу силових хвиль при русі поїздів це співвідношення зменшується до 1,18...1,22 рази. Загальна різниця між характером сприйняття навантажень промислових та магістральних залізничної колії зберігається. Отже, навіть при однаковому навантаженні, при русі колією з меншими швидкостями руху характерні більші прогини конструкції. Це викликає потребу в застосуванні додаткових демпферних властивостей конструкції. Основним демпфером в конструкції колії є

скріплення та земляне полотно. Отже, для подовження строків роботи колії в умовах обертання зі швидкостями руху менше за 40 км/год., необхідно застосування скріплень з пружними прокладки найбільшої товщини та конструкції, що передбачає роботу за двома етапами: стиск за рахунок випуклих частин конструкції та стиск матеріалу. Та зменшити прогин земляного полотна або за рахунок збільшення товщини баластного шару, або укладанням стабілізуючого шару. Запропоновані заходи дозволять збільшити довжину ділянки, що сприймає навантаження.

**5.3.2. Вплив поодинокого горизонтального навантаження** Всі положення, що були наведені при описанні впливу горизонтального навантаження залишаються незмінними. Основної відмінністю є зміна площини дії поперечних сил. Ця відмінність призводить до того, що поперечні хвилі мають горизонтальну поляризацію. Отже за (5.14) при переході хвилі з одного об'єкту в інший не виникає ні відбитих ні заломлених поздовжніх хвиль. Відбиті та заломлені поперечні хвилі не впливають на вертикальні деформації, оскільки мають вплив тільки на горизонтальні переміщення. Отже дія горизонтального навантаження впливає на напрямок та величину загальних переміщень та не впливає на величину переміщень у вертикальній площині.

#### **5.4. Деформативна робота залізничної колії магістрального та промислового транспорту**

Як було показано вище, основну різницю між характером деформативної роботи колії на промислових підприємствах та магістральних коліях, формують швидкості руху, що застосовані на промислових

підприємствах. Так, в табл. 5.7 наведено співвідношення величин деформативної роботи, яка виконується елементами та конструкцією колії при різних швидкостях руху поїздів.

Таблиця 5.7

**Коефіцієнти співвідношення величин деформативної роботи при різних швидкостях руху**

V, км/год.	конструкція	прокладка	шпала	баласт	земполотно
$A_V / A_{V=10}$					
10	1	1	1	1	1
30	0,17	0,18	0,09	0,469	0,134
60	0,03	0,08	0,03	0,121	0,044
90	0,02	0,07	0,02	0,055	0,025
120	0,01	0,06	0,01	0,044	0,018
деформативна робота в одиницю часу $I_V / I_{V=10}$					
10	1	1	1	1	1
30	0,487	0,513	0,255	1,088	0,391
60	0,159	0,498	0,159	0,679	0,245
90	0,141	0,565	0,129	0,444	0,202
120	0,133	0,655	0,117	0,466	0,184

За результатами табл. 5.7, при менших швидкостях руху величини прогинів конструкції та часу дії навантаження більші, ніж аналогічні величини при більших швидкостях руху, але довжина колії, що сприймає навантаження, менше. Це призводить до різних співвідношень деформативної роботи при різних швидкостях руху. Оцінка роботи елементів та конструкції колії за час дії навантаження характеризує інтенсивність роботи елементів і конструкції колії при різних швидкостях руху. При підвищенні швидкостей руху, збільшується інтенсивність використання прокладок та баластного шару, за рахунок збільшення довжини сприйняття навантаження, на фоні загального характеру зниження інтенсивності використання конструкції колії.

В табл. 5.8 наведено коефіцієнти співвідношення величин деформативної роботи при різних швидкостях руху для різних навантажень.

Таблиця 5.8

**Коефіцієнти співвідношення величин деформативної роботи для різних навантажень**

Об'єкт	навантаження		
	<264 кН	264-294 кН	294-450 кН
$A_F / A_{F<264}$			
конструкція	1	2,21-2,34	7,1-7,63
прокладка	1	2,02-2,25	5,67-7,03
шпала	1	2,17-2,19	6,25-6,83
баласт	1	2,18-2,43	6,49-8,13
земполотно	1	2,18-2,48	6,42-6,85
деформативна робота в одиницю часу $I_F / I_{F<264}$			
конструкція	1	2,01-2,13	5,79-6,02
прокладка	1	1,83-2,06	4,47-5,57
шпала	1	1,90-2,00	4,94-5,38
баласт	1	1,94-2,73	5,07-7,7
земполотно	1	1,98-2,25	5,06-6,63

За результатами табл. 5.8 магістральні залізничні колії під впливом рухомого складу, з навантаженнями до 264 кН, виконують робот меншу, ніж колії промислових підприємств з навантаженнями 264-294 кН та 294-450 кН відповідно у 2,24 та 6,16 рази. А інтенсивність використання елементів та конструкції магістральних колій менша, ніж колій промислових підприємств відповідно у 2,08 та 5,66 рази. Отже, колії промислових підприємств потребують застосування додаткових демпферних властивостей конструкції, які дозволять збільшити довжину ділянки, що сприймає навантаження.

## 5.5. Висновки по розділу 5

1. Аналіз амплітуд коливань вимушених навантажень та конструкції колії показав, що: максимальні значення прогинів конструкції колії не співпадають з максимальними значеннями навантажень за часом; співвідношення максимальних значень прогинів при різних швидкостях руху не відповідають співвідношенням максимальних значень сил при тих же швидкостях руху, ці співвідношення дозволяють врахувати різний характер роботи магістральних та промислових колій від впливу рухомого складу.

2. Форма деформації елементів колії під впливом рухомого складу залежить від співвідношення часу дії навантаження до часу розповсюдження силових хвиль в елементі за напрямками, що дозволяє пояснити основну відмінність роботи колії промислових підприємств, та встановлювати умови сприймання навантажень елементами конструкції колії.

3 Особливість роботи залізничної колії промислових підприємств пов'язана зі швидкостями руху, що застосовані на промислових підприємствах, оскільки вони формують основну різницю між характером деформативної роботи колії на промислових підприємствах та магістральних коліях.

4. Визначено співвідношення між часом дії сили та часом і характером прогинів елементів і конструкції колії. При дії рухомого складу на колію для всіх швидкостей руху максимальні значення амплітуди мають місце при передачі навантажень земляному полотну баластним шаром. Величини вертикальних прогинів від деформативності рейко-шпальної решітки у 1,52...1,81 разів менше ніж величини максимальних прогинів від деформативності всієї конструкції колії при поодинокому навантаженні колії.

Але з врахуванням суперпозиції впливу силових хвиль при русі поїздів це співвідношення зменшується до 1,18...1,22 рази.

5. Амплітуди вимушених коливань мають змінну форму розповсюдження за часом відповідно до характеристик розповсюдження хвиль. Кількість енергії, що переноситься хвилями залежить від кутів падіння та характеристик матеріалів. Вивчення процесу виникнення розповсюдження силової хвилі дозволить прогнозувати та спрямовано регулювати процес деформативності залізничної колії шляхом зміни характеристик матеріалів та конструкції елементів залізничної колії.

6. Характер деформативної роботи магістральних колій, яка виконується під впливом рухомого складу, залежить від швидкості руху поїздів. При підвищенні швидкостей руху, збільшується інтенсивність використання прокладок та баластного шару, за рахунок збільшення довжини сприйняття навантаження, на фоні загального характеру зниження інтенсивності використання конструкції колії.

7. Деформативна робота колій промислових підприємств, що виконується під впливом рухомого складу з навантаженнями 264-294 кН та 294-450 кН, відповідно, у 2,24 та 6,16 рази вище, за деформативну роботу, що виконується магістральними коліями під впливом рухомого складу з навантаженнями меншими за 264 кН. Відповідно інтенсивність використання елементів та конструкції колій промислових підприємств, при зазначених умовах, більша, ніж магістральних колій у 2,08 та 5,66 рази.

Результати, що наведені в розділі, опубліковані в [27, 32].

## РОЗДІЛ 6

### ОЦІНОЧНІ УМОВИ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ КОЛІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

#### 6.1. Оціночні умови за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії

Умови обертання рухомого складу це умови, що забезпечують безпеку руху, дотримання правил обслуговування та утримання, а також допустимий вплив на залізничну колію (за умови обов'язкового виконання яких рухомий склад залізниць може застосовуватися в перевізному процесі). Спочатку під конкретні умови обертання рухомого складу (вантажонапруженість і встановлені швидкості руху) визначаються характеристики підсистеми інфраструктури залізничного транспорту, яка включає в себе верхню будову колії, земляне полотно, водовідвідні, протидеформаційні, захисні та укріплюючі споруди земляного полотна, розташовані в смузі відводу, а також штучні споруди. А вже в процесі експлуатації коригуються умови обертання відповідно до стану підсистеми інфраструктури залізничного транспорту. І при незадовільному стані підсистеми її реконструюють під необхідні експлуатаційні умови.

Всі існуючі нормативні методики розрахунків показників впливу дії рухомого складу залізниць на залізничну колію засновані на виконанні вимог міцності і стійкості. При цьому не завжди їх виконання приводить до позитивного результату, оскільки відсутні чіткі взаємозв'язки між розрахунками за різними методиками, наприклад, розрахунок стійкості земляного полотна жодним чином не пов'язаний з розрахунком його міцності. Крім того, відсутність нормативних критеріїв за деформативними характеристиками, такими як жорсткість або модуль пружності елементів

конструкції колії або самої конструкції та їх зміни протягом експлуатації, призводить, по-перше, до нерівнопружності залізничної колії по довжині; по-друге, до неможливості забезпечення на всіх ділянках залізничних ліній існуючих нормативних значень параметрів напружено-деформованого стану та ресурсу; втретє, до незабезпечення вимог безпечної експлуатації протягом життєвого циклу. Таким чином, існуючі методи і методики оцінки показників впливу рухомого складу на колію не забезпечують свого головного призначення: забезпечення експлуатаційної надійності підсистем інфраструктур.

Основним напрямком зміни нормативної бази залізничного транспорту за останні роки, стало врахування питань з безпеки інфраструктури залізничного транспорту. Так, прийняті і такі що розробляються міжнародні стандарти: ГОСТ 32192-2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения», ГОСТ (проект) «Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта», ГОСТ (проект) «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте», зміни, що внесені в технічний регламент Митного союзу «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» у 2011 р.

Основна вимога з метою забезпечення безпеки до залізничної колії зводиться до того, що: всі складові частини залізничної колії (земляне полотно, верхня будова колії та ін.) та елементи складових частин залізничної колії (рейки, стрілочні переводи, рейкові скріплення, шпали, баласт і ін.) по міцності, несучої здатності і стійкості повинні забезпечувати безпечний рух залізничного рухомого складу з найбільшими швидкостями в межах допустимих значень протягом усього життєвого циклу. При цьому верхня будова колії та земляне полотно повинні забезпечувати стабільність положення залізничної колії в плані і поздовжньому профілі як в навантаженому, так і в ненавантаженому стані протягом всього періоду

експлуатації. Геометричні параметри кривих повинні встановлюватися таким чином, щоб забезпечувати стійкість залізничного рухомого складу, яка перешкоджає сходу його коліс з рейок і перекиданню. А конструкція безстикової колії повинна виключати викиди рейко-шпальної решітки при одночасному впливі поїзних і температурних навантажень.

Внесено зміну, яка полягає в дотриманні функціональної безпеки: властивості об'єкта залізничного транспорту виконувати необхідні функції безпеки при всіх передбачених умовах протягом заданого періоду часу. Узагальнюючим показником безпеки, який визначає необхідну ступінь впевненості того, що об'єкт буде виконувати задані функції безпеки, є рівень повноти безпеки. Ця зміна кардинально змінює принцип, закладений при оцінці впливу дії рухомого складу на колію. Він змінюється від оцінки ризиків на основі правил до оцінки ризиків на основі міркувань безпеки. Раніше було достатньо перевірити відповідність розрізнених показників з нормативними, що розраховані по квазідинамічним моделям. Внесена зміна ставить перед необхідністю розглядати не момент часу (при якому враховані всі несприятливі умови для окремо розглянутої площини), а динамічний процес зміни стану експлуатаційної надійності залізничної колії. Цей процес повинен бути класифікований за комплексною оцінкою положення рейкових ниток в плані і профілі, дефектів рейок, що впливають на їх форму, пружних властивостей колії, при відстеженні горизонтального і вертикального переміщень колеса щодо рейки і проміжок часу, протягом якого відбуваються ці переміщення. Критерії класифікації повинні повністю оцінювати стан залізничної колії відповідно станам надійності.

Враховуючи вищевикладене, можна констатувати факт, що жодна з існуючих нормативних методик не відповідає поставленими завданням. У той же час перехід на цифровий запис експериментальних досліджень [20, 36, 39, 41] підготований до верифікації та валідації даних для документованого підтвердження того, що об'єкт виконує всі задані вимоги до функціональної

безпеки як складової частини надійності, а сучасні методи зйомки просторової геометрії колії [373] дозволяють контролювати ці вимоги.

На надійність і безпеку об'єкта залізничного транспорту чинять вплив трьома способами: через джерела відмов, що відбуваються всередині об'єкта на будь-якому етапі життєвого циклу (системні умови), через джерела відмов, що виникають під час експлуатації об'єкта (умови експлуатації), через джерела відмов, що виникають в об'єкті під час проведення технічного обслуговування (умови технічного обслуговування). При реалізації конкретної залізничної системи необхідно оцінити вплив факторів, які можуть впливати на її надійність і безпеку, і здійснювати управління причиною цих впливів протягом усього життєвого циклу за допомогою застосування відповідного системного управління для оптимізації показників роботи даної системи. Тому необхідно питання про оцінку впливу дії рухомого складу на колію розглядати як динамічний процес, критерії граничних станів якого обумовлені на підставі існуючих нормативів співвіднесених зі станами надійності, а на їх основі розробити критерії по безпеці протягом всього життєвого циклу.

Надійна робота залізниць передбачає сумісну надійну роботу конструкції колії, технічних пристроїв і технічного персоналу, що виконує контроль та виконання робіт. Весь процес надійної роботи колії відповідає нормативно-правовим, організаційно-розпорядним, організаційно-технологічним та технічним вимогам.

Надійна робота конструкції колії передбачає як надійну роботу кожного елемента окремо, так і надійну роботу системи з цих елементів. Тобто, необхідно на базі норм стосовно стану кожного елемента мати базу норм стосовно стану системи з цих елементів, яка є базою для розробки критеріїв, дотримання яких забезпечують надійну роботу колії.

Надійність колії та її функціональна безпека пов'язані між собою, та повинні базуватись на одних теоретичних засадах. Та враховуючи, що функціональна безпека є складовою надійності колії, повинно мати

нормативні критерії, що поєднують між собою технічні, організаційні та економічні аспекти. Методологічну систему стосовно роботи колії необхідно створювати тільки при розгляді взаємодії надійності, безпеки і вартості життєвого циклу деформативної роботи колії, а також визначення та досягнення їх раціонального поєднання для даної системи.

Таким чином, щоб провести аналіз існуючих методів оцінки стану рейко-шпальної решітки залізничної колії необхідно проаналізувати нормативну базу її елементів, нормативну базу рейко-шпальної решітки та розглянути критерії, що встановлюють стан елементів та рейко-шпальної решітки як системи з цих елементів.

Але жоден норматив, що стосується залізничної колії не містить технічного описання що розкриває поняття станів з точки зору надійності для окремих елементів протягом їх терміну експлуатації.

Отже, існує необхідність формування розподілу технічних станів елементів та конструкції колії відповідно станам надійності на основі існуючих нормативних документів та методик оцінок безпечної експлуатації залізничної колії від впливу рухомого складу.

Терміни й визначення основних понять теорії надійності для використання в науці та техніці встановлені чинними стандартами [5, 374...378].

За класифікацією основних понять теорії надійності існує сім станів: справний, несправний, працездатний, критичний, частково працездатний, непрацездатний та граничний. За міжнародним стандартом ГОСТ 32192-2013 для залізничної техніки замість критичного стану введено поняття передвідмовного та небезпечного станів.

Розглянемо відповідність технічних вимог до елементів та безпосередньо рейко-шпальної решітки станам надійності.

Технічно стани елементів конструкції колії решітки описані для рейок у [102, 334, 335, 338, 379...381], для скріплень [334, 335, 379, 382, 383], для

шпал [102, 334, 335, 338, 379, 383, 384], для баластного шару [102, 334, 335, 338, 379, 385], для земляного полотна [102, 103, 334, 335, 338, 386, 387, 388].

Для елементів конструкції колії відсутні будь-які складнощі зі встановленням відповідності станам надійності за вимогами нормативно-конструкторських критеріїв для справного та несправного станів. Для встановлення технічних станів елементів відповідним працездатному, частково працездатному, непрацездатному, критичному та граничному станам надійності, по-перше, необхідно для кожного елемента конструкції колії сформуванати комплекс оціночних умов за допустимими відхиленнями, що відбуваються в процесі експлуатації та впливають на їх функціонування протягом експлуатації. Для цього необхідно провести рутину роботу по аналізу нормативних умов та досліджень стосовно зміни працездатних станів елементів протягом експлуатації. По-друге, визначити вплив сукупної зміни станів елементів на функціонування конструкції колії та за існуючими вимогами улаштування та утримання конструкції колії сформуванати комплекс оціночних умов за допустимими відхиленнями елементів конструкції колії.

Для самої рейко-шпальної решітки як системи, стани описані у [102, 335, 336, 362, 379, 389]. Але з класифікацією виникають складнощі, так як, наприклад, залежно від швидкостей руху змінюються вимоги до елементів стосовно станів, тобто, наприклад, вимоги до працездатного стану колії за станом рейок для першої категорії відрізняється від працездатного стану колії для тієї ж категорії при швидкостях руху 101-120, 121-140, 141-160, 161-200 км/год. Справний стан колії за станом рейок для першої категорії відрізняється від справного стану п'ятої категорії так як при першій категорії колії укладаються нові рейки, а при п'ятій – старопрідатні.

Таким чином необхідно чітко класифікувати стани колії за станами елементів колії та за показниками колієвимірної стрічки.

Розглянемо відповідність станам надійності вимоги класифікації колії за категоріями.

Згідно з [335] справний та несправний стани рейко-шпальної для швидкісної, першої, другої, третьої та четвертої, з вантажонапруженністю більше 30 млн. т. км. бруто на км. за рік, решітки визначають як для її елементів, тобто за вимогами нормативно-конструкторської документації.

Для четвертої, з меншою вантажонапруженністю, п'ятої, шостої та сьомої категорій колії справний та несправний стани визначаються за вимогами улаштування та утримання.

Але для всіх категорій колії за вимогами улаштування та утримання встановлюються працездатний, частково працездатний, непрацездатний та граничний стани.

До основного параметру за яким встановлено класифікації технічного стану елементів та конструкції колії є швидкість руху. Допустимі швидкості руху пасажирських та вантажних поїздів встановлюються за геометричними обрисами як в навантаженому так і в ненавантаженому станах, тому вони і повинні бути прийнятими для визначення меж технічних станів конструкції колії відповідних станам надійності.

Що стосується стану баластної призми, то стан надійності повинен включати не тільки геометричні обриси, а й її забрудненість.

Окрім того, в нормативній літературі існує проблема з визначенням стану земляного полотна, так як застосований термін «здорове» земляне полотно [5, 334, 379] відповідає модулю пружності підрейкової основи значенням 50 МПа влітку та 75-80 МПа взимку, які застосовано:

- при визначенні напружень в елементах колії [102];
- при розрахунках умов укладання рейкових плітей безстикової колії [337];
- при визначенні допустимих швидкостей руху [338];
- при визначенні епюри шпал в конструкції колії [335].

Таким значенням модуля пружності залізнична колія відповідає, якщо її ділянки розташовані на земляному полотні з модулем деформації більше ніж 40 МПа, тобто, земляне полотно складається або зі скельних ґрунтів, або

з сухих, ущільнених за нормами [379]: супісків, легких суглинків, середніх глин, важких глин. В інших випадках, модуль пружності не відповідає вхідним умовам зазначених розрахунків.

Значення фактичного модуля пружності підрейкової основи колії в літку для конструкцій, зазначених в [335], коливається в межах 7,4...69,6 МПа. Значення середнього модуля пружності приблизно 27 МПа. Необхідно розуміти, що це майже у два рази (1,85) нижче, ніж потрібно за вихідними умовами, тому наслідками будуть збільшення коливань колії під впливом рухомого складу, в середньому, в вертикальній площині на 67%, і в горизонтальній – на 24%.

Таким чином, враховуючи зазначене, забезпечити безвідмовність колії на рівні, що встановлено за критеріями [335] при зазначеному в них ресурсі (пропущеному тоннажі, або кількості років) між модернізаціями, посиленими капітальними та капітальними ремонтами без додаткових вкладень, не передбачених міжремонтними схемами та поточним утриманням, не можливо.

Для недопущення надмірних силових дій на колію, тобто, при виконанні умов утримання колії і рухомого складу в справному та несправному, але працездатному стані не було додаткових силових впливів в системі колія-екіпаж-колія, лише можливо при умові рівнопружності колії. Таким чином, необхідно, щоб навіть у несправному стані, жорсткість колії була на одному рівні по всій довжині, і не мала через це додаткові поштовхи від рухомого складу.

Якщо з цією причиною боротись тільки за рахунок розділення вантажних та пасажирських потоків поїздів, то, враховуючи різний вплив на колію вантажних та пасажирських поїздів: при перших коливання більш амплітудні з меншою частотою на малій відстані – короткі хвилі з великою амплітудою, при других вібраційні (менш амплітудні та з більшою частотою) на великих довжинах – довгі хвилі з маленькими амплітудами, це дасть ефект, який не значно вплине на показники надійності безвідмовність та

довговічність без усунення основної причини – накопичення залишкових деформації при експлуатації не міцної, не стійкої, не рівнопружної колії.

Також тільки розподілення потоків поїздів не призведе до утримання встановлених нормативів по розмірах та геометричних окресленнях колії в межах допустимих значень протягом тривалої експлуатації, тобто, дотриманні колії в працездатному стані з максимальним значенням коефіцієнта технічного використання колії. Запропонований захід зніме проблему тільки частково. Так як при не дотриманні умов міцності, стійкості та надійності колії потрібно змінювати технологію поточного утримання колії, а саме вилучення будь-яких робіт, що передбачають локальну підбивку колії, так як ці роботи [77] передбачають зменшення пружності колії до проходу 140 млн.т.км.бр: при пропущеному тоннажі до 25 млн.т.км.бр шпалопідбійками на 50-60%, а машинами на 35-25%, при пропущеному тоннажі 26-140 млн.т.км.бр на 25-20%, що сприяє збільшенню інтенсивності локальних залишкових деформацій, які суперечать вимозі по недопущенню надмірних силових дій на колію та відповідності умовам міцності і стійкості на тривалий період експлуатації. Таким чином, необхідно встановити стани підшпальної основи та пов'язати їх зі станами колії.

Так, на основі нормативної літератури, в табл. 6.1 наведено класифікації технічних станів залізничної колії за деякими станами надійності, що запропонована автором.

Дані, що наведені в табл. 6.1 повністю відображують основні стани надійності колії в залежності від швидкості рухомого складу як для конструкції зібраної з нових, так і старопридатних елементів колії. Але на швидкість руху впливають і геометричні параметри елементів, наприклад, зноси рейок за якими вони вважаються дефектними. І якщо старопридатні рейки лежать у колії, тоді наявність навіть допустимого зносу не впливає на ширину колії, так як вони покладені іншим кантом, але впливають на прогин рейки під навантаженням, за рахунок зменшення площі опору. Таким чином, допустимі відхилення старопридатних елементів конструкції вибирають

запас міцності, стійкості та надійності і потребують компенсацію за рахунок врахування характеристик пішпальної основи та деформативних змін ділянки колії від впливу рухомого складу. А це можливе тільки з врахуванням жорсткісних змін, що відбуваються при впливі рухомого складу на колію та оцінки їх на основі існуючих методик оцінки безпеки від сходів рухомого складу, викидів та зсувів колії зі врахуванням особливості контактної взаємодії рейки та колеса при русі.

Таблиця 6.1

**Класифікація станів надійності залізничної колії за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії**

Швидкість пасажирських / вантажних поїздів, км/год.	Справний стан	Несправний стан	Частково працездат ний	Непрацездатний стан
<b>Допуски по ширині колії, мм</b>				
>140-160/ >80-120	+5, -3	-	-	+6, -4
>120-140/ >80-120	+8, -4	+9, -5	+21, -9	+29,-11
≤ 120/ ≤ 80	+8, -4	+9,-8	+21, -9	+29,-11
<b>Норми відведення ширини колії, мм/м</b>				
>140-160/ >80-120	1/1	1/1,01	1/1,25	1/2,5
>120-140/ >80-120	1/1	1/1,01	1/1,5	1/2,5
>80-120/ >60-80	1/1	1/1,01	1/1,75	1/2,5
≤ 80/ ≤ 60	1/1	1/1,01	1/2	1/2,5
<b>Допустимі відхилення по взаємному положенню рейкових ниток по висоті, мм</b>				
<b>Осідання</b>				
>140-160/ >80-120	4	5,5	6	45
двосторонні	6	8	10	45
односторонні				
>80-140/ >60-120	10	11	21	45
≤ <80/ ≤ 60	10	11	26	45
<b>Перекося</b>				
>140-160/ >80-120 ( на довжині 10 м)	8	9	16	50
>120-140/ >80-120 ( на довжині 20 м)	8	9	16	50
≤ 120/ ≤ 80 ( на довжині 20 м)	8	9	17	

Закінчення табл. 6.1

Різниця в суміжних стрілах вигину (мм), заміряних у середині хорди завдовжки 20 м у кругових кривих				
>140-160/ >80-120	3	4	5	10
>120-140/ >80-120	5	6	8	10
≤ 80-120/ ≤ 60-80	8	9	10	10
Найбільше відхилення від рівномірного наростання стріл на перехідних кривих				
>140-160/ >80-120	2	3	4	90
>120-140/ >80-120	3	4	5	90
>80-120/ >60-80	5	6	10	90
≤ 80/ ≤ 60	10	11	26	90
Номінальна відтань (м) між осями шпал ланкова/безстикова колії				
>140-160/ >80-120	±0,01	-	±0,02	-
≤ 140/ ≤ 120	±0,07/0,03	-	±0,08/0,04	-
Крутизна відведення підвищення зовнішньої рейки, мм/м				
>140-160/ >80-120	0,4	0,5	0,7	4,5
>120-140/ >80-120	0,7	0,9	1,0	4,5
>80-120/ >60-80	0,7	1,3	1,4	4,5
≤ 80/ ≤ 60	1,4	1,8	1,9	4,5
Допустимі нерівності на поверхні кочення рейок в зварних стиках (чисельник), на решті протяжності (знаменник), мм				
>140-160/ >80-120	0,3/0,3	0,5/0,7	1/	6/4
>120-140/ >80-120	0,5/0,7	1/1	1/2	6/4
≤ 120/ ≤ 80	1/1	2/2	2/3	6/4
Норми і допуски влаштування нахилу рейок				
>140-160/ >80-120	1/20	-	-	min1/40 max 1/12
≤ 140/ ≤ 120	1/20	-	-	min1/60 max 1/12
Швидкість пасажирських / вантажних поїздів, км/год.	Справний стан	Несправний стан	Частково працездатний	Непрацездатний стан
Глибина хвилеподібної нерівності або вибоїни, мм				
>140-160/ >80-120	1,0	1,9	2,0	4,0
>120-140/ >80-120	1,0	1,5	2,0	4,0
≤ 120/ ≤ 80	2,0	2,5	3,0	4,0
Провисання кінців (мм), включаючи зминання і сідловину				
>140-160/ >80-120	0,8	0,9	1,0	6,0
>120-140/ >80-120	0,9	1,0	2,0	6,0
>80-120/ >60-80	1,9	2,0	3,0	6,0
≤ <80/ ≤ 60	2,9	3,0	4,0	6,0

## 6.2. Оціночні умови за допустимими значеннями ширини колії та допустимими динамічними розширеннями колії

Розпирання рейкової колії – факт, при якому ширина колії в місці взаємодії рейкових ниток з колісними парами («динамічна» ширина колії) перевищує розміри, що необхідні для утримання колісної пари на рейках. При цьому відбувається провалювання одного з коліс всередину колії.

Початком провалювання колеса є таке положення колісної пари в рейковій колії, при якому фаска колеса, що рухається по внутрішній рейці, співпадає з початком малого закруглення ( $r=15$  (13) мм), рис.6.1.

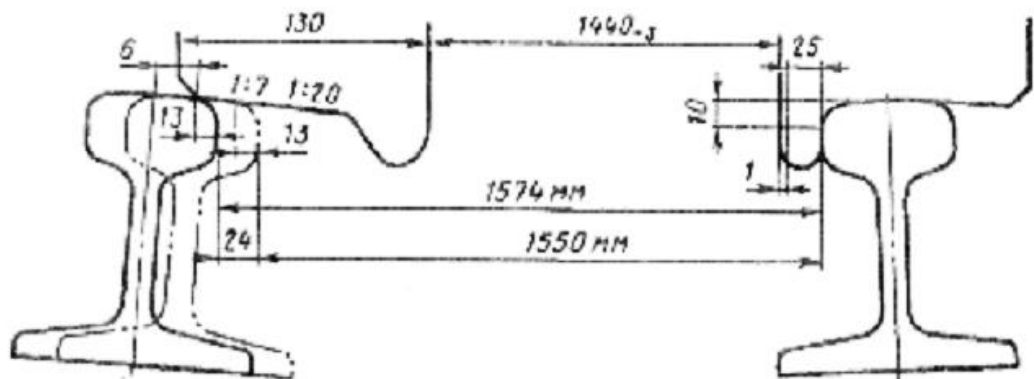


Рисунок 6.1 – Положення колісної пари при визначенні динамічної величини максимальної ширини колії.

Необхідною умовою сходу з рейок рухомого складу є [369]:

$$S + \delta S = S^* \geq [S], \quad (4.10)$$

де  $S$  - статична ширина колії;

$\delta S$  - динамічне розширення колії, що залежить від навантажень;

$S^*$  - динамічна ширина колії;

$[S]$  - критична ширина колії, при якій відбувається провалювання колеса.

При взаємодії колісної пари і рейкової колії забезпечується утримання рухомого складу на рейках якщо між величинами  $S$ ,  $S^*$  та  $[S]$  існує наступна залежність:

$$S < S^* < [S], \quad (6.1)$$

Отже з урахуванням проведених в четвертому розділі досліджень та табл. 6.2 отримано наступні залежності з надійної та функціонально безпечної роботи колії безпечний рух рухомого складу при наступних значеннях  $[S]/\delta S$ , що наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

**Класифікація станів надійної та функціонально безпечної роботи залізничної колії за допустимими значеннями ширини колії та допустимими динамічними розширеннями колії**

Параметр		Стан надійності		
		справний	несправний	непрацездатний
експлуатаційні умови		$[S]/\delta S$	$[S]/\delta S$	$[S]/\delta S$
>140-160/	P65	1545/19	1546/20	1568/42
>80-120	UIC60	1544/18	1545/19	1567/41
>120-140/ >80-120	P65	1546/18	1547/18	1570/29
	UIC60	1545/17	1546/17	1569/28
$\leq 120/\leq 80$ В>10 млн т км бр./км рік	P65	1549/21	1550/21	1573/24
	UIC60	1548/20	1549/20	1572/23
	P50	1547/19	1548/19	1571/22
В $\leq$ 10 млн т км бр./км рік	P65	1550/22	1551/22	1574/25
	UIC60	1549/21	1550/21	1572/23
	P50	1548/20	1549/20	1571/22
приймально-відправні колії	P65	1551/23	1552/23	1574/25
	UIC60	1550/22	1551/22	1572/23
	P50	1549/21	1550/21	1571/22

Запропонована класифікація дозволяє коригувати існуючу методику дослідження сходу з рейок рухомого складу при розпиранні рейкової колії [369].

В основі існуючої методики експертизи лежить задача деформованого твердого тіла, рішення якої передбачає припущення о недеформованості

колісних пар та реформованості рейкових ниток. Сутність методики викладена у [369]. Із застосуванням розроблених класифікацій (табл. 6.1, 6.2) методика визначення дозволяє отримувати дані щодо транспортно-експлуатаційного стану колії з урахуванням зносу поверхні кочення та робочої грані головки рейки. Оскільки табл. 6.2 надає данні щодо допустимими динамічними розширеннями колії при безпечному русі колісної пари, то умови небезпечного та вкрай небезпечного руху визначаються збільшенням величину зазору на ширину площадки з ухилом  $1/7$  до умов небезпечного руху, що дорівнює ширині. Алгоритм методики наступний:

1. Вивчається трасологія (слідова картина) сходу з рейок рухомого складу. Вирішуються різні діагностичні, а при необхідності ідентифікаційні і профілактичні задачі, пов'язані з даними залізнично-транспортною пригодною. Встановлюється передбачувана безпосередня технічна причина сходу. Якщо передбачуваної безпосередньої технічної причиною сходу з рейок є розпирання рейкової колії, то вирішуються перераховані наступні далі завдання [369, 370].

2. Досліджується технічний стан елементів верхньої та нижньої будов колії і встановити відповідність технічного стану вимогам нормативних документів, що діють на залізницях України та на основі запропонованої системи оцінки надійності колії за технічними показниками визначається стан колії (дивись п.6.1 табл. 6.1).

3. Досліджується технічний стан рухомого складу, що зійшов з рейок, і елементів його ходових частин і встановлюється відповідність технічного стану вимогам нормативних документів, що діють на залізницях України.

4. У разі невідповідності технічного стану вимогам нормативних документів встановлюється, в чому саме проявилось це невідповідність, тобто встановлюються несправності елементів верхньої та нижньої будов колії і елементів ходових частин рухомого складу. Встановлюється коло

посадових осіб, на яких покладено обов'язки виконання вимог конкретних пунктів нормативних документів (діагностична задача).

5. Досліджується частка впливу несправностей елементів верхньої будови колії в плані і профілі і несправностей елементів ходових частин рухомого складу на динамічне навантаження на колеса і на рамну силу, тобто встановлюються максимальні значення динамічних навантажень, що діють на колісну пару (діагностична задача).

6. Розглядається рівновага колісної пари, що знаходиться під дією зовнішніх сил і реакцій зв'язків. Припускаючи, що колісна пара є недеформованим твердим тілом, з рівнянь рівноваги колісної пари знаходять значення навантажень на рейки, що передаються від надресорної будови вагону.

7. З використанням рішення спрощеної системи незв'язних диференціальних рівнянь горизонтального вигину і кручення рейки, запропонованої С.П. Тимошенко [67], в площині дії навантажень на рейки визначаються горизонтальні переміщення поперечних перерізів зовнішнього і внутрішнього рейок (на відстані 13 мм нижче поверхні катання головки рейки) і будуються графічні залежності цих переміщень і графіки функцій модуля пружності підрейкові основи щодо кручення і горизонтальної жорсткості рейок в колії.

8. Формулюються аналітичні вирази необхідної і достатньої умов сходу з рейок рухомого складу при розпірання колії.

9. З використанням результатів п.2 та табл. 6.2 визначається розмір динамічного розширення рейкової колії, при якому має місце сходження з рейок рухомого складу.

10. При відомих значеннях зовнішніх навантажень, що передаються від надресорної будови вагону через колісну пару на рейки, і динамічному розширенні рейкової колії, що може призвести до сходу з рейок рухомого складу, з використанням раніше побудованих залежностей (дивись п. 7)

визначаються дійсні значення модуля пружності підрейкової основи щодо кручення і горизонтальної жорсткості рейок колії.

11. Дійсні значення горизонтальної жорсткості рейок в колії і модуля пружності підрейкові основи щодо кручення порівнюються з їх нормативними значеннями. Якщо при цьому виявиться, що розпирання рейкових ниток відбулося при порівняно невеликих динамічних навантаженнях і при дійсній поперечній жорсткості рейок в колії, значно меншій за нормативну, то причини, що призвели до розпирання рейкової колії, слід вбачати в несправності елементів верхньої будови колії; якщо розпирання рейкової колії сталося при порівняно великих динамічних навантаженнях і при дійсній поперечній жорсткості рейок в колії, близькій до нормативного значення, то причини, що призвели до розпирання, слід вбачати в несправності елементів ходових частин рухомого складу або сукупності несправностей як елементів верхньої будови колії, так і ходових частин рухомого складу.

12. Досліджуються умови формування поїзда, в якому стався схід з рейок рухомого складу. Встановлюється невідповідність між вимогами нормативних документів і діями, допущеними посадовими особами при формуванні поїзда. Встановлюється коло осіб, на яких покладено обов'язки виконання вимог конкретних пунктів нормативних документів [390] (діагностична та профілактична задачі).

13. Досліджується режим ведення поїзда і встановлюється невідповідність між вимогами нормативних документів і діями, допущеними членами локомотивної бригади, до сходу, в момент сходу і після сходу з рейок рухомого складу (діагностична та профілактична задачі).

14. Досліджується (при необхідності) психофізичний стан учасників залізнично-транспортної пригоди (в даному виді експертизи - членів локомотивної бригади).

15. Досліджуються можливості запобігання даної залізнично-транспортної пригоди (профілактична задача).

### 6.3. Врахування деформованості колії при оцінці умов щодо забезпечення стійкості колеса на рейці

При набіганні колеса на рейку воно не повинно накочуватися своїм гребенем на неї, тобто необхідно запобігти вповзанню колеса на головку рейки. А якщо колесо виявиться з деяких причин піднесеним, то необхідно, щоб воно опустилося вниз по площині С-с, нахиленою під кутом до горизонту рис. 6.2.

Коефіцієнт стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку визначається відношенням сил, що перешкоджають підйому колеса до сил що викликають цей підйом:

$$k = \frac{(P_1^p + P_2^p - G - N_1) \sin \tau}{F_1 + (Y_p + F_2) \cos \tau}. \quad (6.2)$$

Коефіцієнту  $k = 1,0$  відповідає граничному стану стійкості, гарантована стійкість забезпечується при:  $k = 1,4$  - для локомотивів;  $k = 1,3$  - для вантажних вагонів;  $k = 1,6$  - для пасажирських вагонів;  $k = 1,4$  - для ізотермічних вагонів.

Достатньою умовою сходу є факт коли колісна пара зорієнтована таким чином, що гребень колеса вже знаходиться на поверхні катання головки рейки, рис.6.2. При цьому положенні точка контакту першого колеса буде знаходитися на висоті  $f = 28$  мм (висота гребеня). Цю залежність можна отримати з рівнянь суми моментів точок контактів правого та лівого колеса ( $\sum M_A$  та  $\sum M_B$ ). Отже, достатньою умовою є:

$$f = \frac{(N_2 - P_2^p - P_1^p + N_1 (\cos \tau + \mu \sin \tau)) S_1}{N_1 (\mu \cos \tau - \sin \tau) + Y_p + \mu N_2}. \quad (6.3)$$

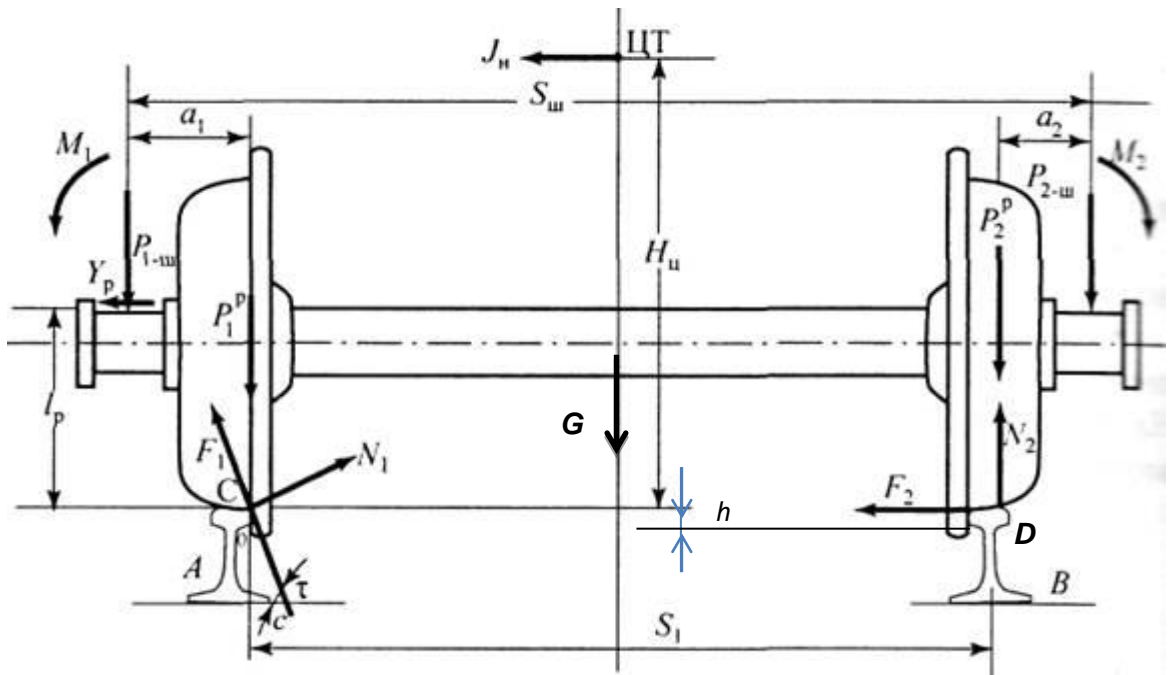


Рисунок 6.2 – Розрахункова схема визначення стійкості колеса на рейці:  $P_{1-ш}$  і  $P_{2-ш}$  - навантаження від кузова на шийки осі колісної пари;  $P_1^p$  і  $P_2^p$  - навантаження від коліс на рейки;  $M_1$  і  $M_2$  - моменти, що діють на шийки осі;  $a_1$  і  $a_2$  - розрахункові консолі шийок осі;  $Y_p$  - рамна сила;  $l_p$  - відстань від головки рейки до місця прикладання рамної сили;  $J_H$  - відцентрова сила;  $H_u$  - відстань від головки рейки до місця прикладання відцентрової сили;  $F_1$  і  $F_2$  - сили тертя гребеня і поверхні кочення коліс по рейках;  $N_1$  і  $N_2$  - реакції рейок;  $S_1$  - відстань між точками контакту коліс з рейками;  $S_u$  - відстань між точками прикладання зусиль до шийок осі,  $G$  - власна вага,  $\tau$  - кут нахилу поверхні С-с (підйому та ковзання гребеня по рейці),  $h$  - різниця між висотами точок контактування правого та лівого коліс,  $f$  - висота гребеня.

За існуючою методикою вкочуванню гребеня колеса на головку рейки сприяють три силових фактори: 1) поперечна сила, що залежить від кута набігання колеса на рейку; 2) рамна сила, що залежить від швидкості руху поїзда, радіусу кривої та підвищення її зовнішньої рейки; 3) розвантаження колеса, що вкочується на рейку, яке залежить від технічного стану елементів

ходових частин рухомого складу і верхньої будови колії та режиму ведення поїзда.

Перші два силових фактора в загальному механізмі залізнично-транспортної пригоди присутні постійно та їх виникнення не пов'язано з порушеннями нормативних документів. Третій силовий фактор виникає як при порушеннях нормативних документів, так і при їх відсутності. Відсутність нормативної документації стосовно певних величин параметрів вертикальної жорсткості як в перетині колії, так і розкиду цих величин по довжині колії призводить до неоднорідності величин жорсткості колії по довжині. При впливі рухомого складу на нерівножорстку колію викликають додаткові коливання як колії так і рухомого складу. Це природний фізичний процес, який неможна ставити в провину колійникам відносно появи додаткових прогинів колії під впливом рухомого складу, тим паче при відсутності нормативних вимог. Цей процес викликає різницю між висотами точок контактування правого та лівого коліс при появі їх розвантаження. За існуючою методикою вважається, що колія не деформується при вкочуванні колеса на рейку. Отже це припущення, по-перше, не враховує додаткову величину, на яку збільшується необхідна відстань підйому колеса для виникнення достатньої умови вкочування колеса на рейку. А по-друге, не враховує долю участі в розвантаженні колеса, що вкочується на рейку. Отже неврахування зазначених факторів може призвести до невірної тлумачення щодо безпосередньої причини залізнично-транспортної пригоди.

Умова недеформованості рейкової колії спостерігається при складанні рівнянь. Вважається що в кожний момент часу дії сил на колію величини реакційних сил колії дорівнюють значенням величин відповідних навантажень. Це припущення виключає наявність будь яких розбіжностей між значеннями прогинів траєкторії колії від силових та параметричних (що змінюються в функції від часу) факторів збудження коливань колії. Відповідно викладеним вище дослідженням в розділі, реакційні сили колії є параметричними. Отже виникає необхідність врахування різниці між

висотами точок контактування правого та лівого коліс  $h(P,V)$  при визначені необхідної та достатньої умови вкочування гребеня колеса на рейку як частки величини  $f$ .

В роботі [369] дуже ретельно викладено достатню умову вкочування колеса на рейку з викладенням методики визначення необхідного часу для реалізації вкочування. При такому контакті навіть за існуючою теорією розрахунку прогин під навантаженою рейкою буде більшим ніж під розвантаженою рейкою. За час вкочування гребеня колеса на першу рейку спочатку зменшиться значення вертикального навантаження на рейку, яке діятиме на бокову поверхню головки рейки, та далі при вкочуванні збільшиться за рахунок зменшення величини куту нахилу поверхні підйому та ковзання гребеня по рейці. Та навпаки відбувається залежність зміни горизонтальної сили значення якої спочатку підйому збільшиться, а далі зменшиться зі зменшенням величини куту нахилу поверхні підйому та ковзання гребеня по рейці. Ці зміни сприяють крученню рейки та перерозподілу навантажень, що передаються на опори. За цей же час на другу рейку та її опори відбувається збільшений вплив вертикальної сили. Зазначені в обох рейках зміни призводять до перерозподілу навантажень на опори та коливанням колії в межах реакції прокладок. Чим менше модуль пружності підрейкової основи, тобто чим менша жорсткість колії, тим більший ухил колісної пари буде реалізовуватись при зазначених коливаннях. Отже, по-перше, існує необхідність врахування зміни рівнів рейкових ниток при перерозподілі навантажень між колесами та, по-друге, нормування жорсткості колії по її довжині.

Перша проблема вирішується врахуванням зміни прогинів за рахунок роботи прокладок  $f = h_{\text{гребеня}} + h_{\text{прокладки}}$ . В табл. 6.3 наведено різниці між висотами точок контактування правого та лівого коліс при розрахунках конструкцій колії із застосуванням скріплення КПП-5-К, отриманими за запропонованим методом визначення напружено-деформованого стану колії.

Таблиця 6.3

**Величини різниць між висотами точок контактування правого та лівого коліс при різних швидкостях руху поїздів, мм**

Швидкість рухомого складу, км/год.					
10	60	120	140	160	200
3,7	2,4	1,5	1,3	1,2	1,1

Друга проблема вирішується нормуванням жорсткості колії. Така робота була проведена в рамках виконання двох науково-дослідних робіт, результати яких надруковано в [12, 15, 16], в межах яких за аналізом стану підрейкової основи було запропоновано оцінку деформативності колії за значенням модуля пружності колії, що наведені в табл. А.2.

**6.4. Рекомендації застосування запропонованого методу стосовно формування класифікації станів колії за умовами стійкості рейко-шпальної решітки**

**6.4.1. Стійкість в подовжньому напрямку колії.** Зазвичай колія оцінюється за показниками міцності, стійкості, колієвимірної стрічки та наявністю дефектів. Але ці фактори не пов'язані між собою оскільки відсутні залежності між станами елементів колії протягом терміну експлуатації та станами конструкцій колії від станів її елементів.

Взаємозв'язок зазначених факторів можливий тільки при вивченні динамічних процесів, що відбуваються в колії під впливом рухомого складу. Всі динамічні процеси пов'язані між собою енергетичними змінами та враховують зміни, що відбуваються при деформативній роботі колії під впливом рухомого складу. Тому необхідно формувати оціночні умови на основі врахування зазначених енергетичних змін, що призводять до змін силової взаємодії між елементами конструкції залізничної колії на основі

запропонованих в роботі критеріїв деформативної роботи елементів та конструкції колії. Та на базі цих залежностей визначати стани безпечності стосовно стійкості конструкції колії. Так зі збільшенням подовжніх стискаючих сил в рейках відбувається збільшення запасу потенційної енергії [391]. При певній величині стискання потенційна енергія, яка накопичується в рейках стає настільки великою, що рейко-шпальна решітка в заданому положенні стає нестійкою. Наслідком цього може бути викид колії в сторону або доверху, який супроводжується звільненням «залишкової» потенційної енергії. За рахунок цієї енергії відбувається різкий вигин рейок, при якому долається вага рейко-шпальної решітки, опір баласту і інші фактори, завдяки чому енергія стискання зменшується. Її запас в рейках остаточно деформованої колії відповідає новому стану стійкої рівноваги між факторами протидії викривленню та стискаючій силі, яка має значно меншу величину. Зазвичай використовують значення подовжньої сили для визначення температурного інтервалу закріплення рейкової колії. Але на значення подовжньої сили впливають не тільки зміни температурних деформацій, а й зміни жорсткісних деформацій. Так при розрахунку сили використовують величини, що характеризують опір баласту при зміщеннях. На даний час ці величини визначені обробкою дослідних даних. Запропонований метод дозволить отримати класифікацію станів баластного шару від кількості циклів навантаження при різних станах ущільнення та забруднення баласту, що притаманні протягом терміну експлуатації. Та при застосуванні розробленої моделі, стане можливим дослідити зміну опору баластного шару зміщенням шпал. За умови використання методики розрахунку параметрів деформативності колії зі застосуванням теорії розповсюдження хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу можна визначити при яких співвідношеннях фізико-механічних, силових та швидкісних параметрах рухомого складу будуть мати місце критичні стани нестійкої рівноваги при певній довжині хорди викривлення, що характеризують подовжню стійкість залізничної колії [29, 35].

**6.4.2. Стійкість колії в поперечному напрямку.** Окрім стійкості в подовжньому напрямку рейкової колії необхідно враховувати поперечну стійкість залізничної колії [110]. Вона залежить від діючих на неї поперечних сил та від опору рейко-шпальної решітки поперечному здвигу. Останній залежить від характеристик і стану поверхонь підрейкових опор та середовища в якому вони знаходяться, а також від величини й характеру силового впливу на опори.

Оскільки з підвищенням швидкостей руху поїздів збільшуються частоти та амплітуди коливань баластного шару, це призводить до зниження опору баластного матеріалу здвигу. За методикою М.Ф. Верігота С.С. Крепкогорського для недопущення залишкових здвигів рейко-шпальної решітки встановлено наступні вимоги до допустимих значень відношень сил:

$$\alpha_1 = \frac{Q_{Г-мах}}{Q_B} \leq |\alpha_1|, \quad (6.4)$$

де  $Q_{Г-мах}$  - найбільше горизонтальне бокове навантаження від рейки на шпалу;

$Q_B$  - середнє значення вертикального навантаження від рейки на шпалу.

допустимі значення відношень для різних швидкостей руху поїздів становлять:

- 1)  $V \leq 120$  км/год.  $|\alpha_1| = 1,4$ ;
- 2)  $120 < V \leq 170$  км/год.  $|\alpha_1| = 1,1$ ;
- 3)  $170 < V \leq 200$  км/год.  $|\alpha_1| = 1,05$ .

Поперечна стійкість рейкової колії залежить від діючих на неї поперечних сил, конструкційних особливостей типу скріплення, що застосовується в конструкції колії та стану баластного шару.

Існують дві експериментальні методики з визначення коефіцієнту запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту.

З першою методикою встановлюють значення коефіцієнту стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають за навантаженнями, що передаються на рейки. Зазначений коефіцієнт оцінюють величинами відношення максимального горизонтального динамічного навантаження до середнього вертикального динамічного навантаження рейки, що обчислюють за формулою:

$$\alpha_1 = \frac{Y_{\max}}{P_{\text{сер}}}, \quad (6.5)$$

де  $Y_{\max}$  - експериментальне значення максимального горизонтального навантаження під направляючою віссю дослідного рухомого складу, кН;

$P_{\text{сер}}$  - середнє значення експериментального вертикального навантаження під тією ж направляючою віссю дослідного рухомого складу, отримане для всіх дослідних заїздів, виконаних з однаковою швидкістю руху, кН.

Коефіцієнт поперечної стійкості згідно з формулою (6.5) визначають як середнє з трьох найбільших значень для кожної колісної пари дослідного рухомого складу за всією сукупністю датчиків на одній випробувальній ділянці, взятих з усіх дослідних заїздів, виконаних з однаковою швидкістю руху.

Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначається навантаженням, що передається на рейки: для баласту з щебеню – 1,4; для баласту з гравію та піску – 1,1.

За другою методикою встановлюють коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначається за рамними силами. Рамні сили визначають експериментально, з урахуванням результатів градувань, із застосуванням: тензометричних схем для вимірювань динамічних напружень у перерізах рам візків, найбільш

чутливих до дії поперечних сил, що виникають у зв'язках рами візка з колісною парою (колiсним блоком); датчиків відносних лінійних переміщень у поперечних горизонтальних (бічних) зв'язках рами візка з колісною парою (колiсним блоком). У разі нерівножорсткості пружних зв'язків для вимірювання рамних сил використовують тільки тензометричні схеми.

Величину вертикального статичного навантаження колісних пар (колiсних блоків) на рейки приймають відповідно до протоколу поколісного зважування.

Рамні сили реєструють за направляючою та останньою за напрямком руху вісю візка дослідного рухомого складу.

Способи градування тензометричних схем і датчиків, застосовуваних для вимірювання рамних сил, визначають відповідно до програми та методики випробувань.

$$\alpha_2 = \frac{Y_{p-\max}}{2P}, \quad (6.6)$$

Величини відношення рамної сили  $Y_{p-\max}$  до вертикального статичного навантаження колісної пари на рейки  $2P$  обчислюють за максимальними спостереженими значеннями реалізацій рамних сил, зареєстрованих під час дослідних поїздок з однаковою швидкістю руху.

Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначається за рамними силами: для баласту з щебеню – 0,4; для баласту з гравію та піску – 0,3.

Теоретичне визначення коефіцієнту поперечної стійкості рейко-шпальної решітки визначають за (6.5) та (6.6). А також визначають умови стабільності, при яких встановлюються співвідношення між навантаженнями від колісних пар на рейки та швидкостями руху, дотримуючись виконання умови:

$$Y_p - I_\alpha + H \leq W_{uu} \alpha_2, \quad (6.7)$$

де  $I_\alpha$  - сила інерції від непогашеного відцентрованого прискорення;

$H$  - бокова сила, що діє на колію без врахування сил інерції;

$W_{uu}$  - граничний опір здвигу навантаженої рейко-шпальної решітки в поперечному напрямку колії при злежалому та ущільненому баласті.

Всі зазначені методики базуються на експериментальних дослідженнях.

Теоретичної методики розрахунку стійкості колії в поперечному напрямку колії при якій можливо врахувати необхідні фактори не існує. Запропонований метод розрахунку деформативності колії здатен розрахувати та оцінити переміщення рейко-шпальної решітки в поперечній площі. За запропонованим методом визначаються стани шпал та скріплень в процесі експлуатації та виконуються розрахунки за методикою зазначеною в другому розділі з урахуванням викладок у четвертому та п'ятому розділах. Основна проблема проявляється в складності самого розрахунку, оскільки за своєю кількістю проведення операцій він подібний до розрахунку методом скінчених елементів. Отже алгоритм розрахунку та оцінки поперечної стійкості рейко-шпальної решітки зводиться до наступних ланок:

1. Визначити вхідні умови розрахунку, що привели до перерозподілу сил на колеса.

2. Визначити значення поздовжніх сил за типом (динамічні, квазістатичні).

3. Визначити для якого стану колії проводяться розрахунки. З урахуванням наявності відхилень від справного стану колії визначити дольову участь у сукупній дії.

4. Визначити чисельні значення навантажень на колеса.

5. Встановити місця та площі контакту рейок та коліс.

6. За запропонованим методом отримати значення переміщень елементів рейко-шпальної решітки.

7. Оцінити результат.

## **6.5. Рекомендації щодо вирішення задач з улаштування конструкції залізничної колії для забезпечення її довговічності**

### **6.5.1. Фізична сутність процесів руйнування залізничної колії.**

Основними прийомами, якими користуються при рішенні задач за сучасними методиками є детерміністична постановка проблеми та застосування апроксимуючих функцій. При наявності численних результатів досліджень роботи елементів конструкції залізничної колії окремо, конструкції залізничної колії в цілому, впливу рухомого складу на колію та роботи системи екіпаж - колія до сих пір відсутня фізично обґрунтована загальнопризнана методика з визначення механізмів появи деформацій та дефектів зазначеної системи. Визначення умов надійної роботи системи екіпаж-колія передбачає виявлення в механізмі роботи системи всіх проміжних подій (складових) в ланцюзі причино-наслідкових зв'язків, які приведуть від безпосередніх причин до кінцевих наслідків. Розкриття механізмів фізичної сутності руйнування колії, по-перше, надає змогу визначити необхідні контролюючі критерії колії, оцінити стан колії за критеріями надійності, прогнозувати роботу колії на різні терміни та визначати оптимальні роботи по її відновленню. По-друге, забезпечити надійну роботу системи екіпаж – колія, для чого встановити критерії контролю цієї системи, класифікувати її стани надійності та прогнозувати її поведження. Моделювання життєвого циклу деформативної роботи колії дозволяє розглядати задачі в стохастичній постановці.

Основою цього моделювання є наявність хвильових процесів, що викликані як зовнішніми, так і власними коливаннями. Всі коливання, що збуджуються контактуванням поверхонь, які до цього моменту не стикалися, або поновили своє контактування через розрив, розповсюджуються сферичними хвилями. Це об'ємні хвилі, в яких амплітуда коливання зменшується пропорційно радіусу розповсюдження. Вони характеризують

основний напрямок розповсюдження хвильового процесу від місця нового або поновленого контакту поверхонь та відповідають за контактні й локальні руйнування. Всі коливання, що збуджуються контактуванням поверхонь, які до цього моменту торкались, та мають контактні зв'язки розповсюджуються квазісферичними хвилями. Вони характеризують основний напрямок розповсюдження хвильового процесу від місця контакту поверхонь та відповідають за неоднорідність коливання. Загалом коливання, що розповсюджується квазісферичними хвилями не може бути прогнозовано на основі апроксимації. Оскільки в процесі розповсюдження відбувається суперпозиція хвиль, то вона характеризує неоднорідність всього процесу коливання. Отже наявність або можливість появи тих або інших хвиль при певних умовах характеризує напрямок та можливість руйнування.

**6.5.2. Алгоритми вирішення задач з улаштування конструкції залізничної колії.** Для розкриття механізму деформативної роботи колії в табл. 6.1 та 6.2 наведено характеристики кутів хвильового процесу. В обох таблицях наведено діапазони кутів в залежності від характеристик елементів конструкції залізничної колії. Кути до пар рейка – повітря та рейка – прокладка при дії поздовжніх та поперечних хвиль наведені в табл. 5.4 та 5.5.

Значення кутів не залежить від типу або поляризації хвиль. Вони визначають основний напрямок розповсюдження, що залежить від умов контактування елементів між собою.

Як було зазначено за модою хвилі можуть бути поздовжніми та поперечними з різним напрямком та формою поляризації. Які в свою чергу можуть бути за формою розповсюдження імпульсу сферичними або квазісферичними. При контактуванні різних поверхонь хвилі можуть змінювати свою моду. За різними променями розповсюдження в залежності від фізико-конструктивних характеристик елементів колії передача імпульсу від одного коливання може суттєво відрізнятись як за модою, поляризацією

так і за формою. Окрім того, при певних умовах коливання можуть змінювати частоту та зникати. Отже при знанні змін стосовно переліченої інформації можна прогнозувати процес деформативності залізничної колії при різних фізико-конструктивних характеристик елементів конструкції колії.

Якщо розглядати загальний процес деформативності в рейках, то в цих елементах від впливу зовнішніх сил розповсюджуються поздовжні та поперечні різної поляризації сферичні хвилі. За даними табл. 5.4 та 5.5 окрім сферичних хвиль в рейках виникають поперечні хвилі при всіх кутах падіння, поздовжні - при кутах падіння до  $40^0$  та при більших ніж  $40^0$  - хвилі Релея.

Деформативний процес в прокладках розповсюджується за допомогою поздовжніх та поперечних різної поляризації квазісферичних хвиль. При будь-яких кутах падіння на прокладку хвилі в прокладці розповсюджуються майже вертикально. Прокладка має імпеданс значно менший за імпеданси рейок та шпал. Отже це з одної сторони, це призводить до виконання демпферних функції прокладки за рахунок деформації її матеріалу та особливостей конструкції, а з другої сторони, це призводить до примусових пластичних змін самої прокладки. За табл. 5.4, 5.5, 7.1 та 7.2 спостерігаємо, що для даного матеріалу прокладки притаманно сприймати всі види хвиль, що передаються від рейок та тільки частково передавати їх на шпали. Такий самий зв'язок спостерігається і в зворотному напрямку при передачі хвильового процесу від шпал до рейки. Прокладка гасить коливання, що передаються поперечними хвилями. Оскільки значення кутів заломлення залежать від швидкості розповсюдження хвиль в матеріалі, то складові, що впливають на значення швидкості розповсюдження хвиль в середовищі є основними факторами, що повинні бути враховані для використання матеріалів при виготовленні прокладки для певних навантажень.

Значення швидкості розповсюдження залежить від значень щільності, модуля пружності та коефіцієнту Пуассона. Для переробки навантажень матеріал прокладки повинен гасити певну кількість та передавати енергії.

Для порівняння роботоздатності різних матеріалів використовується поняття енергії абсорбції (енергії руйнування). Це комбінація видовження і прикладеного до матеріалу навантаження. Потенціал енергії абсорбції встановлюється на дотриманні (2.22). Для виконання необхідної роботи в конструкції сума значення зміни кінетичної енергії та внутрішньої енергії прокладки повинні бути більшими ніж значення сума значення зміни роботи, що здійснюється зовнішніми силами за той же елемент часу  $\delta t$  становить, та теплової енергії, що передається матеріалу прокладки. Виконання зазначеної умови можливо якщо при переробці навантажень енергію, що переносять поперечні хвилі будуть передані далі а не будуть гаситись матеріалом прокладки. Отже для розглянутого матеріалу прокладки при матеріалі зі значенням коефіцієнту Пуассону меншим ніж 0,4 поперечні хвилі не впливатимуть на її роботу. За табл. 5.1 цей параметр може коливатись в межах 0,3-0,485. Отже при значеннях коефіцієнту Пуассону менше ніж 0,4 рейка буде сприймати навантаження, що переносяться поперечними хвилями, а прокладка та шпала будуть сприймати імпульси, що переносяться тільки поздовжніми хвилями. При значеннях коефіцієнту Пуассону більше ніж 0,4 опорам будуть передаватись імпульси як ті, що переносяться як поздовжніми, так і поперечними хвилями. Отже, від характеристик матеріалу прокладки будуть залежати як можливість руйнування прокладки, так і різноманітність впливу на шпалу, та на інші елементи конструкції залізничної колії.

З точки зору забезпечення довговічності роботи колії шляхом подовження її ресурсу необхідно вирішити задачу зі знаходження співвідношення між навантаженнями та фізико-конструктивними характеристиками скріплень, що сприятиме подовженню строків роботи прокладок та раціонального вибору системи утримання та ремонтів колії.

В табл. 6.4 та 6.5 наведено параметри переходу хвиль з одного елемента до іншого для різних контактуючих пар.

Таблиця 6.4

**Коефіцієнти відбиття та заломлення хвильового процесу в різних контактних парах при дії поздовжніх хвиль**

Контактні пари	Кути, градус							
	падіння	відбиття		заломлення		критичні		
		I	II	III				
ПОЗДОВЖНЯ ХВИЛЯ								
		$\rho_I$	$s_I$	$\rho_{II}$	$s_{II}$			
прокладка - шпала	10	10	1,3-6,99	14,04-26,99	17,53	5,35 - 22,6	0- 36,6	7,48 - 44,5
	20	20	2,55-13,87	63,38	36,38			
	30	30	3,73-20,51	-	60,13			
	40	40	4,8-26,77	-	-			
	50	50	5,72-32,47	-	-			
	60	60	6,47-37,37	-	-			
	70	70	7,03-41,19	-	-			
	80	80	7,37-43,64	-	-			
Шпала-баласт	10	10	6,4-6,65	0,59-1,09	0,36-0,67	-	-	39,9 - 41,8
	20	20	12,68-13,18	1,15-2,15	0,71-1,32			
	30	30	18,71-19,47	1,69-3,15	1,03-1,93			
	40	40	24,36-25,37	2,17-4,05	1,33-2,48			
	50	50	29,44-30,71	2,58-4,83	1,58-2,95			
	60	60	33,76-35,26	2,9-5,462	1,79-3,34			
	70	70	37,08-38,79	3,17-5,93	1,94-3,62			
	80	80	39,19-41,04	3,32-6,21	2,03-3,80			
Баласт-земолотно	10	10	3,28-11,40	10,85-25,78	5,78-12,06	23,5 - 67,2	56,2 - 89,9	19,2 - 37,8
	20	20	6,47-22,91	21,77-58,94	11,43-24,30			
	30	30	9,48-34,69	32,83	16,85-36,98			
	40	50	12,23-47,02	44,19	21,87-50,66			
	50	60	14,62-60,68	56,17	26,36-67,17			
	60	70	16,58-80,30	69,90	30,13			
	70	80	18,04	-	33,00			
	80	50	18,93	-	34,81			

За результатами табл. 6.4 та 6.5 спостерігаємо, що поздовжні силові хвилі, що падають на прокладку під кутами від  $0^0$  до  $80^0$  сприймаються прокладкою та подовжують розповсюдження у вигляді поздовжніх та поперечних хвиль під кутами відповідно  $0,68...15,99^0$  та  $0,34...2,690$ . Поперечні силові хвилі, що передаються прокладці рейкою, при тих же кутах падіння, розповсюджуються подовжніми хвилями під кутами  $1,16...28,83^0$  та

поперечними  $0,62...4,72^0$ . Але передача силових хвиль шпалам від прокладки відбувається тільки поздовжніми силовими хвилями, оскільки поперечні хвилі на 97% не проходять в шпалу за рахунок відбиття. Отже величина енергії, що переносилась поперечними хвилями демпфірується прокладками.

Таблиця 6.5

**Коефіцієнти відбиття та заломлення хвильового процесу в різних контактних парах при дії поперечних хвиль**

Контактні пари	Кути, градус							
	паді ння	відбиття		заломлення		критичні		
		I	II	III				
поперечна хвиля								
		$s_I$	$p_I$	$p_{II}$	$s_{II}$			
прокладка - шпала	10	10	18,96	-	-	2,85 - 3,76	4,30 - 5,84	7,48 - 44,5
	20	20	39,78	-	-			
	30	30	69,3	-	-			
	40	40	76,69	-	-			
	50	50	-	-	-			
	60	60	-	-	-			
	70	70	-	-	-			
	80	80	-	-	-			
Шпала-баласт	10	10	9,46-15,62	0,88-1,70	0,54-1,04	-	-	39,9 - 41,8
	20	20	18,89-32,04	1,743,34	1,06-2,05			
	30	30	28,25-50,85	2,54-4,89	1,56-2,99			
	40	40	85,55	3,27-6,29	2,00-3,85			
	50	50	-	3,89-7,50	2,38-4,59			
	60	60	-	4,40-8,49	2,70-5,19			
	70	70	-	4,78-9,21	2,92-5,63			
	80	80	-	5,01-9,66	3,07-5,90			
Баласт-земолотно	10	10	16,47-42,25	17,91-45,25	9,46-19,95	14,1 - 34,4	30,6 - 89,9	19,2 - 37,8
	20	20	33,95	37,28	18,89-42,22			
	30	30	54,74	62,30	25,25-79,23			
	40	40	-	-	37,48			
	50	50	-	-	46,48			
	60	60	-	-	55,06			
	70	70	-	-	62,80			
	80	80	-	-	68,77			

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Складання геометричної моделі конструкції колії.
2. Встановлення фізичних характеристик елементів конструкції колії.
3. Введення граничних умов.
4. Введення початкових умов (характеристик змін контактної площі і сили впливу за часом) для визначення основних характеристик імпульсу.
5. Побудова просторового розповсюдження імпульсу з урахуванням умов переходу імпульсу з одного елемента в інший.
6. Визначення величини переміщень та напружень в прокладці.
7. Оцінка за (2.22). Встановлення необхідні корегування.
8. Повторення розрахунку при зміненому п. 2 бо пп. 1 та 2.

Залізобетонна шпала має більший імпеданс, ніж баластний шар. Отже вона передає навантаження та при цьому частка його переробки мала, тобто більша частина енергії імпульсу пройде в баластний шар.

В залежності від контакту опираючись на баласт, шпала передає різні за формою розповсюдження хвилі: квазісферичні хвилі, що переносили імпульс від зовнішнього навантаження, та створює додатковий імпульс, що переноситься сферичними хвилями. При цьому шпала змінює кути передачі імпульсу, значення яких залежить від характеристик скріплення та місця розташування контактної площадки рейки з колесом.

Кожний тип скріплення в залежності від своєї конструкції має різну площу контакту зі шпалою та різну довжину (в поздовжньому напрямку колії) передачі навантаження від рейки до шпали. Чим більші зазначені площа контакту та довжина, тим більший кут повороту шпали при проході колеса по рейці. Але при цьому тим більша площа та довжина що передають навантаження на шпалу, чим зменшують кількість енергії, що направлена на деформативність рейок.

Площа контакту шпали з баластом, впливає на кількість енергії, що передається шпалою на баластний шар. Більша площа контакту шпали з баластом сприяє проходженню імпульсу, що передається квазісферичними хвилями. Менша площа контакту шпали з баластом сприяє появі додаткової

енергії, направленою на руйнацію шпали та баластного шару. Певне співвідношення зазначених енергій призводить до деформації межі баластного шару з земляним полотном. Непрямолінійність границі розділу баластного шару та земляного полотна сприяє появі додаткових квазісферичних хвиль, отже збільшенню енергії, що направлена на збільшення неоднорідності баластного шару та верхньої частини земляного полотна. Направленість додаткових хвиль сприятиме появі додаткових руйнувань поверхонь щебеневого баласту та земляного полотна.

Непорушність границь баластного шару та земляного полотна можна забезпечити шляхом підсилення верхньої частини земляного полотна геосинтетиками. Для цього необхідно вирішити задачу з вибору конструкції, що забезпечує перерозподіл передачі енергії на межі баластного шару з земляним полотном: або шляхом забезпечення її рівномірної передачі, або її гасінням. Тобто визначити фізико-конструктивні характеристики шару верхньої частини земляного полотна з урахуванням умов навантаження та фізико-конструктивних характеристик існуючої конструкції [37...39]. Задача вирішується шляхом дотримання (2.6) та (2.22).

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Складання геометричної моделі конструкції колії.
2. Встановлення фізичних характеристик елементів конструкції колії.
3. Введення граничних умов.
4. Введення початкових умов (характеристик змін контактної площі і сили впливу за часом) для визначення основних характеристик імпульсу.
5. Побудова просторового розповсюдження імпульсу з урахуванням умов переходу імпульсу з одного елемента в інший.
6. Визначення величин переміщень та напружень в баластному шарі та земляному полотні.
7. Оцінка за (2.6) та (2.22). Встановлення необхідні корегування.
8. Повторення розрахунку при змінених пп. 1 та 2.

## 6.6. Висновки по розділу 6

1. Запропоновано ввести класифікацію станів надійної та функціонально безпечної роботи залізничної колії за існуючими допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії, що забезпечить виконання вимог стосовно надійної роботи колії за міждержавним стандартом ГОСТ 32192-2013.

2. Запропоновано розподіл допустимих значень ширини колії та допустимих значень динамічних розширень колії від дії рухомого складу за класифікацію станів надійності залізничної колії в залежності від співвідношення ширини колії та параметрів коливання рухомого складу в поперечній площині відносно колії.

3. Надано доповнення до існуючої методики дослідження сходу з рейок рухомого складу при розпиранні рейкової колії шляхом застосування розробленого розподілу допустимих значень ширини колії та допустимих значень динамічних розширень колії від дії рухомого складу за класифікацію станів надійності залізничної колії в залежності від співвідношення ширини колії та параметрів коливання рухомого складу в поперечній площині відносно колії.

3. Надано рекомендації до існуючої методики дослідження сходу з рейок рухомого складу при вкочуванні гребня колеса на головку рейки шляхом врахування динамічних прогинів рейок при розвантажені коліс. Для конструкції колії зі скріпленням КПП-5-К величини різниць між висотами точок контактування правого та лівого коліс при різних швидкостях руху поїздів при швидкості руху рухомого складу 10 км/год. становлять 3,7 мм, при швидкості руху 60 км/год. – 2,4 мм, при 120 км/год. – 1,5 мм

3. Надано рекомендації стосовно застосування запропонованого методу при визначенні стійкості рейко-шпальної решітки та складено алгоритм

розрахунку та оцінки поперечної стійкості рейко-шпальної решітки на базі розробленого методу визначення напружено-деформованого стану колії.

4. Складено алгоритми щодо вирішення задач з улаштування конструкції залізничної колії для забезпечення її довговічності шляхом вивчення процесу виникнення розповсюдження силової хвилі в елементах конструкції колії, що дозволяє спрямовано регулювати процес деформативності залізничної колії шляхом зміни характеристик матеріалів та конструкції елементів залізничної колії. Запропоновано для прокладки скріплень КПП-5-К застосовувати матеріал з коефіцієнтом Пуассону менше ніж 0,4. Застосування пропозиції призводить до зменшення силового впливу на прокладку, шляхом сприймання його рейкою, що зменшить інтенсивність експлуатації прокладки.

Результати, що наведені в розділі, опубліковані в [25, 29, 35, 46...50].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних досліджень набули розвитку наукові основи рішення актуальної науково-прикладної проблеми оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу шляхом розробки сучасних методів визначення раціонального, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, періодичності міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у такому:

1. На підставі аналізу, з точки зору гармонізації національних та європейських технічних стандартів, нормативної бази та результатів основних напрямків дослідження з визначення параметрів взаємодії залізничної колії та рухомого складу, сформульована проблема щодо відсутності фізично обґрунтованого загально призаного методу з визначення механізмів передачі навантажень від рухомого складу на колію в часі та методу визначення параметричних даних розповсюдження взаємодії колії та рухомого складу. Існуючі методи з оцінки роботи колії потребують удосконалення, яке повинно бути направлене на прогнозування виконання робіт з обслуговування та ремонту залізничної колії і недопущення змін у її технічному стані, який не забезпечує необхідний рівень безпеки руху та обсяги перевезень, шляхом встановлення зв'язку між умовами функціонування елементів колії та роботою конструкції колії.

2. Введення і використання понять та критеріїв деформативної роботи, яка запропонована в дисертації, дозволяє створити зв'язок між технічними станами елементів і конструкції колії, характеризує явища, що відбуваються в елементах та конструкції колії під впливом рухомого складу протягом терміну її експлуатації, та дозволила сформулювати загальні підходи до

оцінки роботи залізничної колії, що враховує деформативні властивості елементів залізничної колії.

3. Завдяки формалізації поняття та критерію деформативної роботи і сформованому комплексу оціночних умов, в якості основи класифікації надійності залізничної колії, що запропоновані в роботі, розроблено метод теоретичної оцінки деформативної роботи колії за параметрами взаємодії колії та рухомого складу, який дозволяє дослідити зв'язок між фактичними умовами експлуатації колії, періодичністю міжремонтних схем та технічними станами елементів і конструкції колії для визначення їх раціонального співвідношення, з точки зору технічного використання колії, при забезпеченні довговічності та повноти безпеки колії.

4. Основні особливості розробленої моделі просторових коливань конструкції залізничної колії як механічної системи елементів, обумовлені застосуванням положень теорії розповсюдження пружних хвиль, що дозволило: описати механізмів передачі навантажень від рухомого складу на колію імпульсами, які задаються контактними площадками параметрично за траєкторією рухомого складу вздовж колії; отримати аналітичні залежності з визначення особливостей розповсюдження динамічного навантаження, які на відміну від існуючих, враховують частоту імпульсу сили, що залежить від швидкості руху, частоту прикладання сили в одному перетині, що залежить від характеристик рухомого складу, змінну направленість в часі та зв'язок між амплітудами коливань як усередині елементів так і при переході від одного елементу до іншого; описати процес розповсюдження імпульсу силовими хвилями в конструкції колії за часом з урахуванням зворотної реакції елементів на них; показати можливість спрямованого регулювання розповсюдження навантаження користуючись властивостями силових хвиль.

При аналізі результатів моделювання встановлено співвідношення між часом дії сили та часом і характером прогинів елементів і конструкції колії. При дії рухомого складу на колію для всіх швидкостей руху максимальні значення амплітуди коливання конструкції колії мають місце при передачі

навантажень баластним шаром земляному полотну. Величини вертикальних прогинів від деформативності рейко-шпальної решітки у 1,52...1,81 разів менше ніж величини максимальних прогинів від деформативності всієї конструкції колії при поодинокому навантаженні колії. Але з врахуванням суперпозиції впливу силових хвиль при русі поїздів це співвідношення зменшується до 1,18...1,22 рази.

5. Врахування змін напружено-деформованого стану елементів колії від швидкості і напрямку розповсюдження силових хвиль в елементах колії та інтенсивності і часу впливу рухомого складу під час руху колією, дозволило удосконалити метод визначення параметрів напружено-деформованого стану елементів конструкції залізничної колії.

6. Проведено експериментальну оцінку достовірності розробленої моделі. За порівнянням параметрів напружено-деформованого стану колії, встановлено, що напруження в кромках рейок, отриманих за запропонованою моделлю просторових коливань конструкції залізничної колії відрізняються від отриманих експериментально на 2,3%, та підтверджує достовірність розробленої моделі. Різниця результатів розрахунку та експерименту за вертикальними прогинами рейок становить 19,5%, що обумовлено особливостями розташування прогиномірів, виміри яких не враховують прогини баластного шару та земляного полотна. Для підтвердження врахування особливостей розповсюдження силових хвиль запропонованою моделлю, проведено експеримент зі встановлення місць розташування датчиків виміру горизонтальних сил та фіксації датчиками поздовжніх сил, яким пояснено фізичну природу розкиду величин, що фіксуються датчиками при експерименті.

7. В залежності від наявності вертикального та бокового зносів рейок визначено параметри ширини контактної зони на поверхні кочення рейки, величини яких коливаються в межах 12,82...59,94 мм.

Визначено величини зазорів між колесом та рейкою, при яких відбувається безпечний рух (бандаж опирається на головку рейки частиною з

уклоном 1/20) в залежності від наявності вертикального та бокового зносів рейок. При контакті коліс зі старопридатною рейкою з боковими зносами 7, 15 та 18 мм в неробочій грані контактування по поверхні кочення відбувається по зоні з конусності 10 при наявності вертикального зносу 2 мм відповідно  $0 < \delta < 17,9 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 25,9 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 28,9 \text{ мм}$ ; при наявності вертикального зносу 3 мм відповідно  $0 < \delta < 18,9 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 26,9 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 29,9 \text{ мм}$ ; при наявності вертикального зносу 4 мм відповідно  $0 < \delta < 18,1 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 26,1 \text{ мм}$ ,  $0 < \delta < 29,1 \text{ мм}$ . При більших значеннях зазору контакт відбувається по зоні з конусністю 3,5 м.

8. Застосування розробленої моделі просторових коливань конструкції залізничної колії дозволило:

- доповнити методику дослідження сходу з рейок рухомого складу при вкочуванні гребня колеса на головку рейки шляхом врахування динамічних прогинів рейок при розвантаженні коліс. Для конструкції колії зі скріпленням КПП-5-К величини різниць між висотами точок контактування правого та лівого коліс при різних швидкостях руху поїздів при швидкості руху рухомого складу 10 км/год. становлять 3,7 мм, при швидкості руху 60 км/год. – 2,4 мм, при 120 км/год. – 1,5 мм.

- пояснити фізичну сутність передачі силових хвиль за конструкцією колії та показати можливість спрямованого регулювання процесу деформативності залізничної колії шляхом зміни характеристик матеріалів та конструкції елементів залізничної колії. Запропоновано для прокладки скріплень КПП-5-К застосовувати матеріал з коефіцієнтом Пуассону менше ніж 0,4. Застосування пропозиції призводить до зменшення силового впливу на прокладку, шляхом сприймання його рейкою, що зменшить інтенсивність експлуатації прокладки.

9. Встановлено, що особливість роботи залізничної колії промислових підприємств пов'язана зі швидкостями руху, які застосовані на промислових підприємствах, оскільки вони формують основну різницю між характером деформативної роботи колії на промислових підприємствах та магістральних

коліях, що полягає в різному сприйнятті навантажень елементами колії. Обертання рухомого складу зі швидкостями меншими ніж 60 км/год сприяє збільшенню прогинів конструкції ніж при обертанні рухомого складу з більшими швидкостями руху, навіть при однаковому навантаженні на неї, за рахунок участі меншої довжини колії, що сприймає навантаження. Для швидкостей руху менших за 40 км/год, що притаманні промислового транспорту, основним елементом, який сприймає навантаження є баластний шар.

10. Запропоновано ввести класифікацію станів надійної та функціонально безпечної роботи залізничної колії за існуючими допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії, що забезпечить виконання вимог стосовно надійної роботи колії за міждержавним стандартом ГОСТ 32192-2013. Та запропоновано розподіл допустимих значень ширини колії та допустимих значень динамічних розширень колії від дії рухомого складу за класифікацію станів надійності залізничної колії в залежності від співвідношення ширини колії та параметрів коливання рухомого складу в поперечній площині відносно колії. Застосування зазначених класифікацій дозволило доповнити методику дослідження сходу з рейок рухомого складу при розпіранні рейкової колії.

11. Використання запропонованих в дисертації теоретичних положень дозволяє удосконалити методи оцінки роботи колії під впливом рухомого складу, шляхом врахування вимог стосовно надійної роботи колії, направленими на недопущення змін у її технічному стані, який не забезпечує необхідний рівень безпеки руху та обсяги перевезень. Та на їх основі створити механізм приведення національних технічних стандартів застосованих на залізничному транспорті в Україні до законодавства Співтовариства. Метод визначення параметричних даних розповсюдження взаємодії колії та рухомого складу, шляхом опису процесу розповсюдження імпульсу навантаження силовими хвилями в конструкції колії за часом з урахуванням зворотної реакції елементів на них, є новим та дозволяє

вирішувати задачі з улаштування й утримання конструкції залізничної колії при забезпеченні її довговічності та повноти безпеки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вантажні перевезення у 2016 році [Електронний ресурс] // Офіційний веб-сайт Державної служби статистики України. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp\\_u/vp1216\\_u.htm](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp_u/vp1216_u.htm).

2. Пасажирські перевезення у 2016 році [Електронний ресурс] // Офіційний веб-сайт Державної служби статистики України. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp\\_u/vp1216\\_u.htm](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp_u/vp1216_u.htm).

3. Постанова «Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту» від 11.07.2013 № 494 [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/494-2013-п>.

4. Розпорядження «Про схвалення Транспортної стратегії України на період до 2020 року» від 20.10.2010 р. N 2174-р [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-р>.

5. Постанова «Про затвердження Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки» від 16.12.2009 р. №1390 [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-п>.

6. Директива 2008/57/ЄС Європейського Парламенту та Ради року «Про оперативну сумісність/ інтеперабельність залізничних систем у межах Співтовариства» від 17.06.2008 [Електронний ресурс] // Міністерством інфраструктури України. – 2008. – Режим доступу до ресурсу:

<http://www.transport-ukraine.eu/docs/direktiva-200857ies-ievropeyskogo-parlamentu-ta-radi-vid-17-cherhvnya-2008-roku-pro-operativnu>

7. Директива 2004/49/ЄС Європейського Парламенту та Ради «Про безпеку залізниць у Співтоваристві, яка вносить зміни до Директиви Ради 95/18/ЄС про ліцензування підприємств залізничного транспорту та до Директиви 2001/14/ЄС про розподіл потужностей залізничних інфраструктур та стягнення платежів за використання залізничної інфраструктури та про сертифікацію безпеки» від 29.04.2004 № 2004/49/ЄС [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: [http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994\\_953](http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_953)

8. Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) IEC 62278-3 (2002-09-19) Intern. Electrotechnical Commission Technical Report 62278. Geneva, Switzerland, 2002. - 159 p.

9. ГОСТ 32192-2013 Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 2014-07-01, измен. 2016-01-01 – М.: Стадартинформ, 2014. – 32 с.

10. Директива 2001/14/ЄС Європейського Парламенту та Ради року Про виділення потужності залізничної інфраструктури та стягнення плати за використання залізничної інфраструктури та сертифікації безпеки від 26.02. 2001. [Електронний ресурс] // Міністерством інфраструктури України. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.transport-ukraine.eu/docs/direktiva-200114ies-ievropeyskogo-parlamentu-ta-radi-vid-26-lyutogo-2001-roku-pro-vidilennya>

11. Харлан В. І. Вирішення задач вибору раціональних швидкостей руху поїздів за допомогою математичного моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки / В. І. Харлан, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – №16. – С. 41–44.

12. Бондаренко И. А. К вопросу о повышении качественной оценки работоспособности железнодорожного пути / И. А. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – №18. – С. 46–50.

13. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – №19. – С. 78–83.

14. Рыбкин В. В. Методика оценки эксплуатационной надежности стрелочных переводов и их элементов / В. В. Рыбкин, Е. М. Баль, И. А. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – №35. – С. 124–128.

15. Бондаренко І. О. Рекомендації щодо проектування конструкцій нижньої будови залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №36. – С. 100–104.

16. Бондаренко І. О. Щодо забезпечення якості проектування конструкції земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №37. – С. 120–123.

17. Рибкін В. В. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів / В. В. Рибкін, О. М. Баль, І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №38. – С. 127–133.

18. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Транспортні системи і технології. – 2011. – №18. – С. 14–18.

19. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – №43. – С. 139–148.

20. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В. Е. Савлук. // Будівництво, реконструкція та експлуатація конструкцій і споруд залізничного транспорту. – 2012. – №31. – С. 225–230.

21. Бондаренко І. О. Стосовно питань щодо підвищення стабільності земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Транспортні системи і технології. – 2011. – №21. – С. 22–27.

22. Курган Д. Н. Модель напружено-деформованого состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Н. Курган, И. А. Бондаренко. // Problemy Kolejnictwa-Zeczyt. – 2013. – №159. – С. 99–111.

23. Бондаренко І. О. Стосовно питань моделювання життєвого циклу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №55. – С. 78–89.

24. Настечик М. П. Дослідження напруженого стану в елементах вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 під дією рухомого складу / М. П. Настечик, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №56. – С. 146–156.

25. Bondarenko I. O. Formation of estimated conditions for life cycle of deformation work of the railway track / I. O. Bondarenko. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №57. – С. 107–111.

26. Бондаренко І. О. Особливості дослідження процесу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №58. – С. 87–98.

27. Бондаренко І. О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №59. – С. 75–83.

28. Бондаренко И. А. К вопросу об оценке влияния воздействий подвижного состава на путь / И. А. Бондаренко. // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2015. – №3. – С. 65–70.

29. Бондаренко І. О. Особливості деформативної роботи залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №60. – С. 45–56.

30. Бондаренко І. О. Вплив контакту рейки та колеса на деформативну роботу залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – №10. – С. 77–81.

31. 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). – С. 4–10.

32. 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). – С. 28–36.

33. Бондаренко І. О. Стосовно визначення функціонально-безпечної ширини колії / І. О. Бондаренко. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – №12. – С. 74–80.

34. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Тези XII

Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту». - Дніпропетровськ, 2008. - С. 45.

35. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д.М.Курган, І.О.Бондаренко. // Тези 69 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». - Дніпропетровськ, 2009. - С. 160-161.

36. Патласов О.М. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко, В. Є. Савлук. // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. - С. 176-177.

37. Бондаренко І.О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. - С. 177-178.

38. Рибкін В. В. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. М. Баль, І. О. Бондаренко. // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. - С. 178-179.

39. Бондаренко І.О. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В.Є. Савлук. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №37. – С. 124–128.

40. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту». - Дніпропетровськ, 2012. - С. 27-28.

41. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В.Є. Савлук. // Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту». - Дніпропетровськ, 2012. - С. 28-29.

42. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології». – Київ, 2013. - С. 96.

43. Рибкін В. В. Оцінка втомлено-міцнісних характеристик елементів вузла проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 при повторно-змінних циклах навантаження конструкції / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу». - Дніпропетровськ, 2013. - С. 39.

44. Курган Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу». - Дніпропетровськ, 2013. – С. 73-74.

45. Бондаренко І. О. До вирішення задач з прогнозування стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль [Текст] / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу». - Дніпропетровськ, 2013. – С. 74-75.

46. Бондаренко І. О. Стосовно питань визначення надійності роботи земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези

74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2014. – С. 14.

47. Бондаренко І. О. Щодо застосування геоматеріалів в конструкціях земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Тези 74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2014. – С. 22

48. Бондаренко І. О. Особливості, що необхідно враховувати при відновленні стану земляного полотна / І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародного технічного семінару «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії». - Львів, 2014. – С. 22.

49. Стеллей М. Перспективи дослідження модульної колійної техніки в Україні [Текст] / М. Стеллей, Р. Голтгаус, О.М. Баль, М. А. Арбузов, І. О. Бондаренко, В. Є. Савлук. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 216-218.

50. Бондаренко І. О. Особливості, що необхідно враховувати при відновленні стану земляного полотна / І. О. Бондаренко. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 218-219.

51. Бондаренко І. О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 219-220.

52. Бондаренко І.О. Надійність і ресурсозбереження залізниць / І. О. Бондаренко. // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 26-27.

53. Бондаренко І. О. Стосовно оцінки впливу дії рухомого складу на залізничну колію / І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції ім. Сокола Е. М. «Безпека руху і наукові засади експертних

досліджень транспортних пригод та інженерних споруд». – Львів, 2015. – С. 57-59.

54. Бондаренко І. О. Аналіз впливу колісної пари на процес деформативної роботи колії / І. О. Бондаренко. // Тези XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2016. – С. 26-27.

55. Zimmermann H. Die Berechnung des Eisenbahn-Oberbaues / H. Zimmermann. – Berlin: Ernst und Korn, 1888. – 308 p.

56. Петров Н. П. Влияние поступательной скорости на напряжения в рельсе / Н. П. Петров. – С.-Петербург: Записки РТО, 1903. – 89 с.

57. Петров Н. П. Постепенное развитие и современное состояние вопроса о напряжениях, вызываемых в рельсе вертикальными силами / Н. П. Петров. // Железнодорожное дело. – 1904. – №5. – С. 43–51.

58. Петров Н. П. Напряжения в рельсах от изгибов в вертикальной плоскости и вероятность определения этих напряжений опытами / Н. П. Петров. – С.-Петербург: Записки РТО, 1906. – 107 с.

59. Васютинский А. Л. Наблюдения над упругими деформациями железнодорожного пути / А. Л. Васютинский. – С.-Петербург: Сб. института инженеров путей сообщения, 1899. – 130 с.

60. Холодецкий А. А. Исследование влияния внешних сил на верхнее строение железнодорожного пути / А. А. Холодецкий. // Инженер. – 1898. – №9. – С. 177–202.

61. Цеглинский К. Ю. Железнодорожный путь в кривых / К. Ю. Цеглинский. – М., 1903. – 155 с.

62. Тимошенко С. П. К вопросу о прочности рельсов / С. П. Тимошенко. // Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1975. – С. 322-358.

63. Тимошенко С. П. О динамических напряжениях в рельсах / С. П. Тимошенко // Статические и динамические проблемы теории упругости / С. П. Тимошенко. – Киев.: Наукова думка, 1975. – С. 28-44.

64. Тимошенко С. П. К вопросу о вибрациях рельсов / С. П. Тимошенко. // Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1975. – С. 359-370.

65. Тимошенко С. П. Влияние начальной осадки шпалы на условие изгиба рельс / С. П. Тимошенко. // Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1975. – С. 371-380.

66. Тимошенко С. П. Метод исследований статических и динамических напряжений в рельсе / С. П. Тимошенко // Статические и динамические проблемы теории упругости / С. П. Тимошенко. – Киев.: Наукова думка, 1975. – С. 209-220.

67. Тимошенко С. П. Напряжения в железнодорожном рельсе / С. П. Тимошенко // Статические и динамические проблемы теории упругости / С. П. Тимошенко. – Киев: Наукова думка, 1975. – С. 316–355.

68. Мелик-Асланов Х. Б. Силы, действующие на железнодорожный путь от подвижного состава, и связь их со скоростями поездов / Х. Б. Мелик-Асланов. – Баку: Азгиз, 1918. – 38 с.

69. Митюшин Н. Т. О влиянии на напряжения в рельсах поперечных горизонтальных сил, появляющихся при движении поездов по прямым частям пути / Н. Т. Митюшин. – М.: тип. им. Карла Маркса, 1922. – 155 с.

70. Годыцкий-Цвирко А. М. Взаимодействие пути и подвижного состава / А. М. Годыцкий-Цвирко. – М.: Гострансиздат, 1931. – 215 с.

71. Марье Г. Взаимодействие пути и подвижного состава. Труды ЦНТУ НКПС вып. 2. / Г. Марье. – М.: Госжелдориздат, 1933. – 336 с.

72. Степкин С. А. О местных напряжениях в рельсах при кручении / С. А. Степкин. // Труды ЛИИЖТ. – 1937. – №127. – С. 66–85.

73. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов / О. П. Ершков. // Труды ВНИИЖТ. – 1955. – №97. – С. 189–325.

74. Вериго М. Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава / М. Ф. Вериго. // Труды ВНИИЖТ. – 1955. – №97. – С. 25–288.

75. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, В. Н. Данилов, Е. М. Бромберг, М. А. Фришман. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.

76. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность – М.: Трансжелдориздат, 1954. – 70 с.

77. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути / М. А. Чернышев. – М.: Транспорт, 1967. – 236 с.

78. Шахунянец Г. М. Модули упругости различных подрельсовых оснований и их формирование / Г. М. Шахунянец, Н. М. Хазинский. // Труды МИИТ. – 1973. – №382. – С. 30–41.

79. Яковлев В. Ф. Исследование упруго-динамических характеристик пути в горизонтальной плоскости / В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов, Л. Н. Фролов. // Труды ЛИИЖТ. – 1968. – №280. – С. 82–98.

80. Карманов А. А. О модуле упругости железнодорожного пути метрополитенов / А. А. Карманов, Д. В. Митюшин, В. Ю. Шадрин // Повышение надежности и эффективности работы железнодорожного пути в условиях роста осевых нагрузок подвижного состава / А. А. Карманов, Д. В. Митюшин, В. Ю. Шадрин. – М.: Транспорт, 1989. – (Труды МИИТ). – С. 77–79.

81. Щепотин К. И. О природе формирования модуля упругости рельсового основания / К. И. Щепотин // Вопросы устройства и работы железнодорожного пути / Под редакцией проф. В.Г. Альбрехта. – Новосибирск, 1964. – (Труды НИИЖТ). – С. 211–237.

82. Лазарян В. А. Об экспериментальном определении сил трения в пути / [В. А. Лазарян, М. А. Фришман та ін.] // Исследования взаимодействия пути и подвижного состава / В. А. Лазарян, М. А. Фришман. – Днепропетровск, 1967. – (Труды ДИИТ). – С. 4–14.

83. Леванков И. С. О выборе расчетных значений модуля упругости подрельсового основания / И. С. Леванков. // Труды ДИИТ. – 1967. – №88. – С. 83–86.

84. Управление надежностью бесстыкового пути / [В. С. Лысюк, В. Т. Семенов, В. Е. Ермаков та ін.]. – М.: Транспорт, 1999. – 373 с.

85. Фришман М. А. Исследование изменения вертикальной жесткости пути по его длине / М. А. Фришман, И. С. Леванков. // Труды ДИИТ. – 1972. – №138. – С. 48–57.

86. Фришман М. А. Исследование изменения вертикальной жесткости пути по его длине / М. А. Фришман, И. С. Леванков. // Труды ДИИТ. – 1973. – №142. – С. 3–10.

87. Леванков И. С. О двух видах неупругого сопротивления, связанного с работой сил трения в пути / И. С. Леванков. // Труды ДИИТ. – 1973. – №142. – С. 103–110.

88. Ершков О. П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити / О. П. Ершков. // Труды ВНИИЖТ. – 1960. – №192. – С. 59–101.

89. Альбрехт В. Г. К вопросу о сопротивлении рельсошпальной решетки продольным сдвигающим силам / В. Г. Альбрехт. // Техника ж.-д.. – 1951. – №12. – С. 10–14.

90. Альбрехт В. Г. О продольных силах, возникающих на поверхности соприкосновения подошвы рельса и основания при проходе колес подвижного состава / В. Г. Альбрехт. // Труды МИИТ. – 1955. – №80/1. – С. 3–111.

91. Коган А. Я. Продольные силы в железнодорожном пути / А. Я. Коган. // Труды ВНИИЖТ. – 1967. – №192. – С. 3–58.

92. Вериго М. Ф. Общие положения для корректировки Правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский. // Труды ЦНИИ МПС. – 1972. – №466. – С. 6–42.

93. Деформативные характеристики разных конструкций пути / В. О. Певзнер, В. В. Андрашко, Р. С. Липовский, М. И. Уманов. // Труды ДИИТ. – 1986. – №246. – С. 100–110.

94. Леванков И. С. К вопросу определения величины вертикальной силы, действующей от колеса на рельс, в динамике / И. С. Леванков. // Труды ДИИТ. – 1973. – №142. – С. 95–103.

95. Леванков И. С. Статический расчет рельса под действием одиночной силы с учетом особой нелинейности упругой характеристики подрельсового основания / И. С. Леванков. // Вестник ВНИИЖТ. – 1972. – №7. – С. 34–38.

96. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

97. Некоторые теоретические и практические вопросы, связанные с внедрением стрелочных переводов на железобетонных брусках / Э. И. Даниленко, В. П. Гнатенко, В. И. Черник, Н. Н. Шавловский. // межвузовский сборник научных трудов Исследования взаимодействия пути и подвижного состава. – 1997. – С. 20–31.

98. Даниленко Э. И. Расчетно-теоретический метод определения упруго-динамических параметров для обычной конструкции пути и многониточных путей / Э. И. Даниленко. // межвузовский сборник научных трудов Исследования взаимодействия пути и подвижного состава. – 1997. – С. 32–41.

99. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.

100. Даниленко Э. И. Розрахунки залізничної колії на міцність і стійкість / Э. И. Даниленко. – Киев, 2000. – 164 с.

101. Лысюк В. С. Надежность железнодорожного пути / В. С. Лысюк, В. Б. Каменский, Л. В. Башкатова. – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.

102. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість ЦП- 117 від 13.12.2004, №960-ЦЗ // Укрзалізниця, Київ: Транспорт України, 2006. – 168 с.

103.Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії ЦП-0204 від 25.12.2008, №557-ЦЗ // Укрзалізниця, Київ, 2009. – 44 с.

104.Pozy M. A vasuti felepitmeny szamitasa / Mihaly Pozy. – Budapest: Akademiai Kiado, 1950. – 64 p.

105.Winkler E. Die Lehre von der Elastizitat und Festigkeit / Winkler E.. – Prag, 1867. – 338 p.

106.Winkler E. Der Eisenbahn-Oberbau. Vorträgen Über Eisenbahn, gehalten am polytechnischen Institute in Wien / Winkler E.. – Prag, 1871. – 250 p.

107.Власов В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М.: Физматгиз, 1960. – 492 с.

108.Данович В. Д. Пространственные колебания вагонов на инерционном основании : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов» / Данович В. Д. – Днепропетровск, 1981. – 40 с.

109.Токмурзина Н.А. Разработка методики расчета воздействия подвижного состава с различными осевыми формулами на путь: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов» / Токмурзина Н.А. – Алмата, 1999. – 26 с.

110.Шахунянц Г. М. Расчеты верхнего строения пути / Г. М. Шахунянц. – М.: Трансжелдориздат, 1959. – 264 с.

111.Вериго М. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Вериго, А. Л. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 557 с.

112.Грицык В. И. Расчеты земляного полотна железных дорог / В. И. Грицык. – М.: МПС, 1998. – 519 с.

113.Исаенко Э. П. Подготовка железнодорожного пути к скоростному движению пассажирских поездов / Э. П. Исаенко, С. Ю. Иванов, М. В. Безруков. – Нижний Новгород: Нижегородский печатник, 2001. – 167 с.

114. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Г. М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.

115. Александров А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 399 с.

116. Александров В. М. Контактные задачи для упругого клина / В. М. Александров. // МТТ. – 1967. – №2. – С. 162–168.

117. Александров В. М. Антиплоская задача о движении сосредоточенной касательной нагрузки по двухслойному упругому основанию с постоянной скоростью / В. М. Александров, Е. С. Зайцева. // ПММ. – 2001. – №1. – С. 129–135.

118. Бабешко В. А. О решении одного класса смешанных задач для слоистого полупространства / В. А. Бабешко, Т. И. Белянкова, В. В. Калинин. // Докл. РАН. – 2001. – №380. – С. 619–622.

119. Бабешко В. А. Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости / В. А. Бабешко. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

120. Бабешко В. А. Динамика неоднородных линейно-упругих сред / В. А. Бабешко, Е. В. Глушков, Ж. Ф. Зинченко. – М.: Наука, 1989. – 344 с.

121. Белоконь А. В. К теории динамических задач с подвижными возмущениями для неоднородной упругой полосы / А. В. Белоконь. // ДАН СССР. – 1981. – №261. – С. 1079–1082.

122. Белоконь А. В. Волны в неоднородном по толщине слое, вызванные движущимися нагрузками / А. В. Белоконь, А. В. Наседкин. // ПММ. – 1987. – №51. – С. 296–302.

123. Бреховский Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховский, О. А. Годин. – М.: Наука, 1989. – 411 с.

124. Ворович И. И. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей / И. И. Ворович, В. А. Бабешко. – М.: Наука, 1979. – 319 с.

125.Ворович И. Л. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах / И. Л. Ворович, В. А. Бабешко, О. Д. Пряжина. – М.: Научный мир, 1999. – 246 с.

126.Гетман И. П. Математическая теория нерегулярных волноводов / И. П. Гетман, Ю. А. Устинов. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1993. – 144 с.

127.Горшков А. Г. Динамические контактные задачи для абсолютно жестких тел и упругого полупространства / А. Г. Горшков, Д. В. Тарлаковский. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 48 с.

128.Гринченко В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – К.: Наукова думка, 1981. – 283 с.

129.Колесников В. И. Моделирование динамического поведения системы «Верхнее строение железнодорожного пути — слоистая грунтовая среда» / В. И. Колесников, Т. В. Суворова. – М.: Изд-во ВИНТИ РАН, 2003. – 232 с.

130.Поручиков В. Б. Методы динамической теории упругости / В. Б. Поручиков. – М.: Наука, 1986. – 328 с.

131.Сеймов В. М. Колебания и волны в слоистых средах / В. М. Сеймов, А. Н. Трофимчук, О. А. Савицкий. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.

132.Слепьян Л. И. Интегральные преобразования в нестационарных задачах механики / Л. И. Слепьян, Ю. С. Яковлев. – Л.: Судостроение, 1980. – 224 с.

133.Улитко А. Ф. Метод собственных векторных функций в пространственных задачах теории упругости / А. Ф. Улитко. – К.: Наукова думка, 1979. – 261 с.

134.Шульга Н. А. Основы механики слоистых сред периодической структуры / Н. А. Шульга. – К.: Наукова думка, 1981. – 200 с.

135.Бабешко В. А. К расчету поведения на слое двух штампов при наличии вибрации / В. А. Бабешко, Т. В. Корнева. // ПМ. – 1978. – №14. – С. 46–52.

136.Бабешко В. А. Вибрация системы круглых штампов со сцеплением на слоистом основании / В. А. Бабешко, Т. В. Корнева // Сб. «Механика сплошной среды» / В. А. Бабешко, Т. В. Корнева. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1981. – С. 32–40.

137. Ватульян А. О. Возбуждение волн колеблющимся штампом в анизотропном слое / А. О. Ватульян, Т. В. Корпенева, М. Г. Селезнев. // Изв. АН Арм.ССР, механика. – 1975. – №28. – С. 3–11.

138. Глушкова Н. В. Определение и учет сингулярных составляющих в задачах теории упругости : дис. докт. физ.-мат. наук : 01.02.04 / Глушкова Н. В. – Краснодар, 2000. – 220 с.

139. Горшков А. Г. Динамические контактные задачи для абсолютно жестких тел и упругого полупространства / А. Г. Горшков, Д. В. Тарлаковский. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 48 с.

140. Молотков Л. А. Матричный метод в теории распространения волн в слоистых средах / Л. А. Молотков. – Л.: Наука, 1984. – 202 с.

141. Петрашень Г. Л. Волны в слоисто-однородных изотропных упругих средах / Г. Л. Петрашень, Л. А. Молотков, П. В. Крауклис. – Л.: Наука, 1982. – 289 с.

142. Попов Г. Я. Контактные задачи для линейно-деформируемого основания / Г. Я. Попов. – К.: Высшая школа, 1982. – 168 с.

143. Пряхина О. Д. Нестационарные колебания упругой балки на вязкоупругом основании / О. Д. Пряхина. // Изв. АН СССР. МТТ. – 1992. – №1. – С. 164–169.

144. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках / Х. А. Рахматуллин, Е. И. Шемякин, Ю. А. Демьянов, А. В. Звягин. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 624 с.

145. Сеймов В. М. Динамические контактные задачи / В. М. Сеймов. – К.: Наукова думка, 1976. – 284 с.

146. Селезов И. Т. Исследование численным методом обращения неустановившихся движений упругого полупространства / И. Т. Селезов, В. А. Ткаченко. // ДАН УССР. Серия А. – 1977. – №3. – С. 240–243.

147. Суворова Т. В. О распределении контактных напряжений в слоистой среде под действием движущихся нагрузок / Т. В. Суворова // Современные проблемы механики сплошной среды. Сб. трудов VI международной

конференции, Ростов-Дон / Т. В. Суворова. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2000. – С. 147–150.

148. Haskell N. A. The dispersion of surface waves on multilayered media / Haskell. // *Bull. Seism. Soc. Amer.*. – 1953. – №43. – С. 17–34.

149. Thomson W. T. Transmission of elastic waves through a stratified medium / Thomson. // *J. Appl. Phys.* – 1950. – №21. – С. 89–93.

150. Achenbach J. D. Moving load on a flexible supported Timoshenko beam / J. D. Achenbach, C. T. Sun. // *International Journal of Solid and Structures*. – 1965. – №1. – С. 353–370.

151. Филиппов А. В. Колебания деформируемых систем / А. В. Филиппов. – М.: Машиностроение, 1970. – 734 с.

152. Fryba L. *Vibrations of Solids and Structures Under Moving Loads* / Fryba. – Groningen: Noordhoff International Publishing, 1972. – 511 с.

153. Jezequel L. Response of periodic systems to a moving load / Jezequel. // *ASME Journal of Applied Mechanics*. – 1981. – №48. – С. 603–618.

154. Bogacz R. On the group-phase velocities relations for continuous systems under moving loads / R. Bogacz, T. Krzyzinski, K. Popp. // *ZAMM*. – 1990. – №70. – С. 202–203.

155. Bogacz R. On dynamics of systems modeling continuous and periodic guideways / R. Bogacz, T. Krzyzinski, K. Popp. // *Archives of Mechanics*. – 1993. – №45. – С. 575–593.

156. Belotserkovskiy P. M. High-frequency vertical vibrations of a rail under the action of a mobile harmonic force / Belotserkovskiy. // *Mechanics of Solids V.* – 1995. – №30. – С. 177–185.

157. Belotserkovskiy P. M. On the oscillations of infinite periodic beams subjected to a moving concentrated force / Belotserkovskiy. // *Journal of Sound and Vibration*. – 1996. – №193. – С. 706–712.

158. Belotserkovskiy P. M. Periodic string response to an impact and a suddenly applied concentrated stationary force / Belotserkovskiy. // *Journal of Sound and Vibration*. – 1999. – №228. – С. 51–68.

159.Lansing D. L. The displacements in an elastic half-space due to a moving concentrated normal load / Lansing., 1966.

160.Labra J. J. An axially stressed railroad track on an elastic continuum subjected to a moving load / Labra. // *ActaMechanica*. – 1975. – №22. – C. 113–129.

161.Felszeghy S. F. The Timoshenko beam on an elastic foundation and subject to a moving step load / Felszeghy. // *Journal Vib Acoust.* – 1996. – №118. – C. 277–284.

162.Dieterman H. A. The equivalent stiffness of a half-space interacting with a beam. Critical velocities of a moving load along the beam / H. A. Dieterman, A. V. Metrikine. // *European Journal of Mechanics A/Solids*. – 1996. – №15. – C. 67–90.

163.Dieterman H. A. Critical velocities of a harmonic load moving uniformly along an elastic layer / H. A. Dieterman, A. V. Metrikine. // *Trans. ASMEJ. of Applied Mechanics*. – 1997. – №64. – C. 596–600.

164.Dieterman H. A. Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load / H. A. Dieterman, A. V. Metrikine. // *European Journal of Mechanics A/Solids*. – 1997. – №16. – C. 295–306.

165.Kruse H. Eigenfrequencies of a two-mass oscillator uniformly moving along a string on a visco-elastic foundation / H. Kruse, A. V. Metrikine, K. Popp. // *Journal of Sound and Vibration*. – 1998. – №218. – C. 103–116.

166.Krzyzynski T. On dynamics of a railway track modelled as a two-dimensional periodic structure / Krzyzynski. // *HEAVY VEH SYST.* – 1999. – №6. – C. 330–344.

167.Kononov A. V. The elastic field generated by two loads moving along two strings on an elastically supported membrane / A. V. Kononov, H. A. Dieterman. // *Journal of Sound and Vibration*. – 1998. – №214. – C. 725–746.

168.Knothe K. Gleisdynamik und Wechselwirkung zwischen Fahrzeug and Fahrweg / Knothe. // *Z ANGEWMATHMECH.* – 1999. – №79. – C. 723–737.

169. Grundmann H. The response of a layered half-space to traffic loads moving along its surface / H. Grundmann, M. Lieb, E. Trommer. // Arch. Appl. Mech.. – 1999. – №69. – С. 55–67.

170. Кондауров В. И. Численное моделирование процесса внедрения жесткого тела вращения в упругопластическую преграду / В. И. Кондауров, И. Б. Петров, А. С. Холодов. // ПМТФ. – 1984. – №4. – С. 132–139.

171. Кукуджанов В. Н. Численное решение неоднородных задач динамики твердого тела / В. Н. Кукуджанов, В. И. Кондауров // «Механика. Новое в зарубежной науке» Сборник научных трудов под ред. Шапиро Г. С / В. Н. Кукуджанов, В. И. Кондауров. – М.: Мир, 1975. – С. 35–84.

172. Отклик элементов конструкций из упруговязкопластического материала на импульсное воздействие / В. Л. Баранов, К. Р. Беликов, И. В. Дунаева, О. В. Моржов. – Тула-Русе: ТулГУ, "Дунарит", ЕАД, 2000. – 209 с.

173. Устойчивость ударно нагруженных стержней / В. Л. Баранов, И. В. Лопа, З. Ч. Чивиков, П. С. Сименов. – Тула: ТулГУ, 1997. – 128 с.

174. Баранов В. Л. Напряженно-деформированное состояние цилиндрических элементов при импульсном ударном нагружении / В. Л. Баранов, Р. А. Тер-Данилов, В. Ю. Воробьев. // Известия ТулГУ. Серия "Технические науки". – 2007. – №4. – С. 35–41.

175. Кийко И. А. Цилиндрическая оболочка под действием осевой ударной нагрузки / И. А. Кийко. // Изв. АН СССР. МТТ. – 1969. – №2. – С. 135–138.

176. Малышев А. П. Волновые процессы в упругой тонкостенной цилиндрической оболочке при внезапном приложении силы к ее торцу / А. П. Малышев. // Изв. АН СССР. МТТ. – 1969. – №2. – С. 139–141.

177. Зуев В. В. Определяющие соотношения и динамические задачи для упруго-пластических сред с усложненными свойствами / В. В. Зуев. – М.: ФМ, 2006. – 174 с.

178. Зуев В. В. Определяющие соотношения теории пластичности в пространствах деформаций и напряжений / В. В. Зуев. // Докл. АН СССР. – 1978. – Т.242 №4. – С. 792–795

179. Зуев В. В. Продольно-сдвиговое динамическое нагружение уплотняющихся сред с переменным упругим модулем / В. В. Зуев, А. Г. Шмелева. // Вестник МГАПИ. – 2006. – №3. – С. 124–132.

180. Sharan S. K. Elasto-plastic finite element analysis of a crack in an infinite plate / S. Sharan. // International Journal of Fracture. – 2000. – №103. – С. 163–176.

181. Huang Y. Elasto-plastic Finite-Element Analysis of the Axisymmetric Tube Flaring Process with Conical Punch / Y. Huang, Y. Huang. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2001. – №18. – С. 390–398.

182. Bradley M. Finding solutions to Einstein's equations in terms of invariant objects / M. Bradley, M. Marklund. // Class. Quantum Grav.. – 1996. – №13. – С. 3021–3037.

183. Brunig M. Large strain elastic-plastic theory and nonlinear finite element analysis based on metric transformation tensors / Brunig. // Computation Mechanics. – 1999. – №24. – С. 187–196.

184. Wang L. The Elastic-Plastic Finite Element Alternating Method and the prediction of fracture under WFD conditions in aircraft structures / L. Wang, F. W. Brust, S. N. Atluri. // Computation Mechanics. – 1997. – №19. – С. 370–379.

185. Lewisand R. W. The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media / R. W. Lewisand, B. A. Schrefler. // Meccanica. – 1999. – №34. – С. 231–235.

186. Achenbach L. D. Wave propagation in elastic solids / Achenbach. – Amsterdam: Nord-Holand, 1973. – 425 с.

187. Болотин В. В. Современные направления в области динамики пластин и оболочек / В. В. Болотин. // Киев, Наукова думка. – 1962. – С. 16–32.

188. Власов Б. Ф. Об уравнениях теории изгиба пластин / Б. Ф. Власов. // Изд. АН СССР ОТН. – 1957. – №12. – С. 57–60.

189. Власов В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов. – М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1960. – 492 с.

190. Григолюк Э. И. О динамическом изгибе трехслойных круговых пластин с сжимаемым заполнителем / Э. И. Григолюк, А. Г. Горшков, Ф. А. Коган. // АН УССР «Прикладная механика». – 1978. – №1. – С. 78–87.

191. Коренев Б. Г. Расчет плит на упругом основании / Б. Г. Коренев, Е. И. Черниговская. – М.: Госстройиздат, 1962. – 356 с.

192. Коренев Б. Г. О движении нагрузок по пластинке, лежащей на упругом основании / Б. Г. Коренев. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1965. – №6. – С. 55.

193. Коренев Б. Г. Динамический расчет сооружений / Б. Г. Коренев, Я. Г. Пановко // Сборник "Строительная механика в СССР 1917-1967" / Б. Г. Коренев, Я. Г. Пановко. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 280–329.

194. Ляв А. Математическая теория упругости / А. Ляв. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 674 с.

195. Петрашень Г. И. К теории колебаний тонких пластин / Г. И. Петрашень. // Ученые записки ЛГУ. – 1951. – №149. – С. 172–249.

196. Петрашень Г. И. Проблемы теории колебаний вырожденных систем / Г. И. Петрашень. // Исследования по упругости и пластичности. – 1966. – №5. – С. 3–33.

197. Петрашень Г. И. Об инженерных уравнениях колебаний неидеально-упругих тонких пластин / Г. И. Петрашень, Э. В. Хинен. // АН СССР, труды математического института им В.А.Стеклова, ХСУ. – №95. – С. 151–183.

198. Петрашень И. Об условиях применимости инженерных уравнений колебаний неидеально-упругих пластин. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн / И. Петрашень, Э. В. Хинен. // Издательство «Наука». – 1971. – №11. – С. 48–56.

199. Пшеничнов Т. И. Метод декомпозиций решения уравнений и краевых задач / Т. И. Пшеничнов. // ДАН СССР. – 1985. – Т. 282, №4. – С. 792–794.

200. Пшеничнов Т. И. Решение некоторых задач строительной механики методом декомпозиций / Т. И. Пшеничнов. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. – №4. – С. 12–17.

201. Селезов И. Г. Исследование распространения упругих волн в плитах и оболочках / И. Г. Селезов. // Тр. Конф. по теор. пластин и оболочек. – 1960. – С. 347–352.

202. Филиппов И. Г. Волновые процессы в линейных вязкоупругих средах / И. Г. Филиппов, О. А. Егорычев. – М.: Машиностроение, 1983. – 269 с.

203. Филиппов И. Г. Математическая теория колебаний упругих и вязкоупругих пластин и стержней / И. Г. Филиппов, В. Г. Чебан. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 190 с.

204. Терцаги К. Механика грунтов в инженерной практике (пер. с англ.). Под ред. М.Н.Гольдштейна / К. Терцаги, Р. Пек. – М.: Госстройиздат, 1958. – 608 с.

205. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М. Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1983. – 247 с.

206. Абелев М. Ю. Возведение зданий и сооружений на насыпных грунтах / М. Ю. Абелев, В. И. Крутов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 148 с.

207. Власов В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М.: Физматгиз, 1960. – 491 с.

208. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений / [С. С. Вялов, Ю. К. Зарецкий, В. Г. Гмошинский та ін.]. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 254 с.

209. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.

210. Герсеванов Н. М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения / Н. М. Герсеванов, Д. Е. Польшин. – М.: Госстройиздат, 1948. – 248 с.

211. Герсеванов Н. М. Расчеты фундаментов гидротехнических сооружений на основании учета деформации построенных сооружений / Н. М. Герсеванов. – М.: Госстройиздат, 1923.

212. Гольденштейн М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольденштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 с.
213. Горбунов-Посадов М. И. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
214. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б. И. Далматов. – Л.: Стройиздат, 1988. – 415 с.
215. Денисов Н. Я. О природе деформации глинистых пород / Н. Я. Денисов. – М.: Изд-во Мин. речного флота, 1951. – 159 с.
216. Денисов Н. Я. Природа прочности и деформации грунтов / Н. Я. Денисов. – М.: Стройиздат, 1979. – 279 с.
217. Денисов О. Г. Основания и фундаменты промышленных и гражданских зданий / О. Г. Денисов. – М.: Высшая школа, 1968. – 377 с.
218. Егоров К. Е. Вопросы теории и практики расчета оснований конечной толщины / К. Е. Егоров. – М.: Госстройиздат, 1961. – 189 с.
219. Жемочкин Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын. – М.: Госстройиздат, 1962. – 240 с.
220. Иванов Н. Н. Уплотнение малосвязных грунтов взрывами / Н. Н. Иванов. – М.: Недра, 1983. – 229 с.
221. Крылов А. Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании / А. Н. Крылов. – Л.: Изд-во АН СССР, 1931. – 154 с.
222. Маслов Н. Н. Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных сооружений / Н. Н. Маслов. – М.: Энергия, 1968. – 160 с.
223. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н. Н. Маслов. – М.: Высшая школа, 1968. – 624 с.
224. Пузыревский Н. П. Фундаменты / Н. П. Пузыревский. – М.-Л.: Госстройиздат, 1934. – 516 с.

225. Соловьев Е. Г. Расчет балок и плит на упругом основании с использованием ЭЦВМ / Е. Г. Соловьев, В. Г. Немов. – Казань: Казанский инженерно-строительный институт, 1974.

226. Терегулов И. Г. Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести / И. Г. Терегулов. – М.: Наука, 1969. – 206 с.

227. Флорин В. А. Расчеты оснований гидротехнических сооружений / В. А. Флорин. – М., Д.: Стройиздат, 1948. – 188 с.

228. Флорин В. А. Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – М.: Госстройиздат, 1959. – Т.1, 357 с.

229. Флорин В. А. Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – М.: Госстройиздат, 1961. – Т.2, 544 с.

230. Прогноз скорости осадок оснований сооружений (консолидация и ползучесть многофазных грунтов) / [Н. А. Цытович, Ю. К. Зарецкий, М. В. Малышев та ін.]. – М.: Стройиздат, 1967. – 228 с.

231. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – М.: Стройиздат, 1963. – 636 с.

232. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.

233. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

234. Гольденблат И. И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.

235. Боткин А. И. О прочности сыпучих и хрупких материалов / А. И. Боткин. // Известия НИИГ. – 1940. – №26. – С. 64–69.

236. Друккер Д. Расширенные теоремы о предельном состоянии для непрерывной среды / Д. Друккер, В. Прагер, Х. Гринберг. // Механика. – 1953. – №1. – С. 98–106.

237. Захаров К. В. Критерии прочности для слоистых масс / К. В. Захаров. // Пластические массы. – 1961. – №8. – С. 61–67.

238. Fisher L. How to predict structural behaviour of RP laminates / L. Fisher. // *Modern Plastics*. – 1960. – Т.37 №10. – С. 120, 122, 127–128, 208–209.
239. Ху Л. В. Анизотропные функции нагружения при сложном нагружении в пластической области / Л. В. Ху, Д. Мэрин // *Механика. Сб. переводов* / Л. В. Ху, Д. Мэрин., 1956.
240. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкции по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1949. – 280 с.
241. Фейсенберг С. М. Принцип предельной напряженности / С. М. Фейсенберг. // *Прикладная механика и математика..* – 1948. – С. 63–68.
242. Drucker D. C. Soil mechanics plastic analysis of limit design / D. C. Drucker, W. Prager. // *Soil mechanics plastic analysis of limit design*. – 1952. – №10. – С. 157–165.
243. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
244. Безухов Н. И. Теория сыпучих тел / Н. И. Безухов. – Л.: Госстройиздат, 1934. – 107 с.
245. Гениев Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
246. Гольденблат И. И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
247. Ерхов М. И. Теория идеально пластических тел и конструкций / М. И. Ерхов. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
248. Зубчанинов В. Г. Математическая теория пластичности / В. Г. Зубчанинов. – Тверь: Тверской гос. технич. университет, 2002. – 448 с.
249. Предельное состояние деформируемых тел и горных пород / [Д. Д. Ивлеев, Л. А. Максимов, Р. И. Непершин та ін.]. – М.: Физматлит, 2008. – 832 с.
250. Ивлеев Д. Д. Механика пластических сред / Д. Д. Ивлеев. – М.: Физматлит, 2001. – 448 с. – (Т. 1. Теория идеальной пластичности).

- 251.Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М.: Гостеортехиздат, 1948. – 375 с.
- 252.Каменярж Я. А. Предельный анализ пластических тел и конструкций / Я. А. Каменярж. – М.: Наука, 1997. – 512 с.
- 253.Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
- 254.Немировский Ю. В. Прочность элементов конструкций из композитных материалов / Ю. В. Немировский, Б. С. Резников. – Новосибирск: Наука, 1986. – 166 с.
- 255.Ольшак В. Современное состояние теории пластичности / В. Ольшак, З. Мруз, П. Пежина. – М.: Мир, 1964. – 243 с.
- 256.Прагер В. Теория идеально-пластических тел / В. Прагер, Ф. Ходж. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 398 с.
- 257.Проценко А. М. Теория упруго-идеально-пластических тел / А. М. Проценко. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
- 258.Терегулов И. Г. Расчет конструкций по теории предельного равновесия / И. Г. Терегулов, Р. А. Каюмов, Э. С. Сибгатуллин. – Казань: ФЭН, 2003. – 180 с.
- 259.Чирас А. А. Методы линейного программирования при расчетах одномерных упруго-пластических систем / А. А. Чирас. – Л.: Стройиздат, 1969. – 198 с.
- 260.Каюмов Р. А. Моделирование поведения и оценка несущей способности системы тонкостенная конструкция-грунт с учетом ползучести и деградации грунта / Р. А. Каюмов, Ф. Р. Шакирзянов. // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2011. – С. 67–75.
- 261.Каюмов Р. А. Определение предельной нагрузки методом вариации упругих характеристик / Р. А. Каюмов. – Казань: Казан, инж.-строит. ин-т., 1987. – 11 с.

262.Каюмов Р. А. Метод вариации упругих характеристик в задаче о предельной нагрузке / Р. А. Каюмов. // Журнал ПМТФ. – 1990. – №3. – С. 134–139.

263.Каюмов Р. А. Об одном методе двусторонней оценки предельной нагрузки / Р. А. Каюмов. // Проблемы прочности. – 1992. – №1. – С. 51–55.

264.Каюмов Р. А. Об оценке несущей способности конструкций при произвольных условиях текучести / Р. А. Каюмов. // Журнал ПМТФ. – 1993. – №1. – С. 115–120.

265.Каямов Р. А. Моделирование нелинейного поведения анизотропных и композитных материалов и конструкции из них : дис. докт. физ.-мат. наук : 01.02.04 / Каямов Р. А. – Казань, 1994. – 386 с.

266.Рутман Ю. Л. Метод псевдожесткостей для решения задач о предельном равновесии жесткопластических конструкций / Ю. Л. Рутман. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 1998. – 53 с.

267.Терцаги К. Строительная механика грунта / К. Терцаги. – М.-Л.: Госстройиздат, 1933. – 392 с.

268.Терцаги К. Теория механики грунта / К. Терцаги. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.

269.Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.: Госиздат физматлите-ратуры, 1960. – 242 с.

270.Голушкевич С. С. Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды / С. С. Голушкевич. – М.: Гостехиздат, 1948. – 148 с.

271.Березанцев В. Г. Осесимметричная задача теории предельного равновесия сыпучей среды / В. Г. Березанцев. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1952. – 120 с.

272.Крей Г. Теория давления земли и сопротивление грунтов пагрузке / Г. Крей. – М.: Госстройиздат, 1932. – 294 с.

273.Герсеванов Н. М. Собрание сочинений / Н. М. Герсеванов. – М.: Стройвоенмориздат, 1948.

274.Прокофьев И. П. Давление сыпучих тел и расчет подпорных стенок / И. П. Прокофьев. – М.: Госстройиздат, 1974. – 109 с.

275.Безухов Н. И. Расчет за пределом упругости. Несущая способность и предельные состояния сооружений / Н. И. Безухов // Строительная механика в СССР. 1917-1967 / Н. И. Безухов. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 212–223.

276.Kötter F. Die Bestimmung des Druckes an gekrümmten Gleitflächen, eine Aufgabe aus der Lehre vom Erddruck / Kötter. // Berlin Akad. Wiss. – 1903. – С. 229–233.

277.Прандтль Л. Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел / Л. Прандтль // Сборник "Теория пластичности" / Л. Прандтль. – М.: Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 102–113.

278.Новоторцев В. И. Опыт применения теории пластичности к задачам об определении несущей способности оснований сооружений / В. И. Новоторцев. – Т.22: Известия ВНИИГ, 1938.

279.Соколовский В. В. Плоское предельное равновесие горных пород / В. В. Соколовский. – М.: Известия АН СССР, 1948. – (ОГН).

280.Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н. Н. Маслов. – М.: Высшая школа, 1968. – 624 с.

281.Ишлинский А. Ю. Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. – М.: Физматлит, 2007. – 704 с.

282.Качанов Л. М. Основы механики разрушения / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 312 с.

283.Рженицын А. Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек / А. Р. Рженицын. – М.: Наука, 1983. – 288 с.

284.Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 753 с.

285.Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Н. Х. Арутюнян. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1952. – 324 с.

286. Месчян С. Р. К вопросу о боковом давлении глинистых грунтов / С. Р. Месчян, Р. П. Малакян. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1974. – №5. – С. 42–43.

287. Месчян С. Р. Ползучесть глинистых грунтов / С. Р. Месчян. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1967. – 319 с.

288. Месчян С. Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения / С. Р. Месчян. – М.: Недра, 1974. – 190 с.

289. Месчян С. Р. Об определении уравнения ползучести глинистых грунтов при сдвиге / С. Р. Месчян. // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1976. – №2. – С. 172–176.

290. Месчян С. Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов / С. Р. Месчян. – М.: Недра, 1978. – 207 с.

291. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.

292. Зарецкий Ю. К. Теория консолидации грунтов / Ю. К. Зарецкий. – М.: Наука, 1967. – 270 с.

293. Зарецкий Ю. К. Вязко-пластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю. К. Зарецкий. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.

294. Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов / Ю. К. Зарецкий. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1989. – 600 с.

295. Мурояма С. Реологические свойства глин / С. Мурояма, Т. Шибота. // Тр. V Межд. конгр. по мех. грунтов. – 1966. – С. 85–96.

296. Шушерина Е. П. Изучение длительной прочности замороженных грунтов при одноосном сжатии / Е. П. Шушерина, С. С. Вялов. // Сб. «Мерзлотные исследования». – 1966. – С. 10–14.

297. Пекарская Н. К. Прочность мерзлых грунтов при сдвиге в зависимости от текстуры. / Н. К. Пекарская. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 106 с.

298. Мирсаяпов И. Т. Физико-механические свойства глинистых грунтов в условиях пространственного напряженного состояния / И. Т. Мирсаяпов, И. В. Королева. // Известия КазГАСУ. – 2010. – №1. – С. 170–175.

299. Reynolds O. The dilating of media composed of rigid particles in contact / Reynolds. // Phil. Magazine. – 1885. – №20. – С. 469–481.

300. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию. / М. Рейнер. – М.: Издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. – 150 с.

301. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

302. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах / Г. М. Ломизе. – М.: Госэнергоиздат, 1951. – 127 с.

303. Городецкий С. Э. Ползучесть и прочность мерзлых грунтов при сложном напряженном состоянии / С. Э. Городецкий. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – №3. – С. 39–42.

304. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике / О. К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542 с.

305. Оден Д. Определение конечных деформаций упругих тел на основе метода конечных элементов / Д. Оден, Д. Кей. // Расчет упругих конструкций с использованием ЭВМ. – 1974. – №1. – С. 52–80.

306. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

307. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

308. Постнов В. А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1974. – 342 с.

309. Розин Л. А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам / Л. А. Розин. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.

310. Образцов И. Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И. Ф. Образцов, Л. М. Савельев, Х. С. Хазанов. – М.: Высшая школа, 1985. – 392 с.

311. Стоянович Г. М. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна при повышенной вибродинамической нагрузке в упругопластичной стадии работы грунтов : дис. докт. техн. наук : 05.22.06 / Стоянович Г. М. – СПб, 2002. – 360 с.

312. Голованов А. И. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел / А. И. Голованов, Д. В. Бережной. – Казань: ДАС, 2001. – 301 с.

313. Исследование предельного состояния грунтового откоса методом конечных элементов / [А. И. Голованов, Р. Ф. Закиров, В. Н. Паймушин та ін.]. // Труды Междунар. конф. "Численные и аналитические методы расчета конструкций". – 1998. – С. 72–76.

314. Исследование напряженно-деформированного и предельного состояния сухих и водонасыщенных грунтов / [Д. В. Бережной, И. Н. Голованов, Г. А. Паймушин та ін.]. // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов: тр. XIX Междунар. конф. СПб.. – 2001. – С. 82–86.

315. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, В. О. Сахаров. // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2004. – №28. – С. 3–10.

316. Суворова Т. В. К расчету волнового поля, возбуждаемого встречными осциллирующими нагрузками в гетерогенном полупространстве / Т. В. Суворова, С. А. Усошин. // В сб. трудов Всероссийской н.-т. конф. «Транспорт-2011». – 2011. – С. 37.

317. 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.

318. Корнилов С. Н. Результаты экспериментального изучения прочностных характеристик барханских песков, слагающих железнодорожное

земляное полотно / С. Н. Корнилов, Ш. Ш. Абдукамилов. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова.. – 2015. – №2015. – С. 105–110.

319. Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China. // *Cold Regions Science and Technology*. – 2010. – №60. – С. 75–83.

320. Lakušić S. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas / S. Lakušić, M. Ahac. // *Technical Gazette*. – 2012. – №19. – С. 427–435.

321. Schulte-Werning B. Advancements in Noise and Vibration Abatement to Support the Noise Reduction Strategy of Deutsche Bahn / B. Schulte-Werning, B. Asmussen, W. Behr. // *Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys.*. – 2012. – №118. – С. 9–16.

322. Planning and Controlling Railway Noise in a Metropolis: Jur Practical Experience / B. Lee, W. Chau, J. Lam, M. Yeung. // *Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys.*. – 2012. – №118. – С. 17–23.

323. Касимов Б. Р. Методика прогнозирования состояния путевой безопасности / Б. Р. Касимов. // *Промышленный транспорт Казахстана*. – 2014. – №1. – С. 19–23.

324. Auersch L. The Influence of the Soil on Track Dynamics and Ground-Borne Vibration / L. Auersch. // *Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys.*. – 2008. – №99. – С. 122–128.

325. Оценка движения экипажа электродинамической транспортной системы с плоской путевой структурой по боковому пути стрелочного перевода / Н. А. Радченко, В. А. Дзензерский, Т. И. Кузнецова, Н. М. Хачапуридзе. // *Техническая механика*. – 2014. – №3. – С. 101–105.

326. Ширин Л. Н. Повышение эффективности работы монорельсовых дорог при подготовке запасов угля к очистной выемке : монография / Л. Н. Ширин, В. А. Расцветаев, А. И. Коваль. – Д.: М-во образования и науки Украины; Нац. горн. ун-т, 2014. – 144 с.

327. Даренский А. Н. Сопротивление промежуточных креплений КБ и КПП-5 перемещениям рельсов в продольной плоскости / А. Н. Даренский, Р. А. Рудник. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2014. – №144. – С. 107–112.

328. Hussein M. Using the PiP Model for Fast Calculation of Vibration from a Railway Tunnel in a Multi-layered Half-Space / M. Hussein, H. Hunt, L. Rikse. // Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys.. – 2008. – №99. – С. 136–142.

329. 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. – №126. – С. 253–287.

330. Thompson D. J. Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems / Thompson. // 21st International Congress on Sound and Vibration (13.07–17.07. 2014). – Beijing, China. – 2014. – №21. – С. 1–16.

331. Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration: a review / [J. Avillez, C. Skinner, M. Frost та ін.]. // ASME Proc. Noise Control And Acoustic Division Conference at InterNoise 2012 (19.08.–22.08. 2012). – New York. – 2012. – С. 381–392.

332. Numerical simulation of dynamic response of subgrade under moving heavy truck in cold regions / Z.Freng, F. DeCheng, L. XianZhang, L. QiongLin. // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2013. – №5. – С. 468–477.

333. Коган А. Я. Продольные силы в железнодорожном пути / А. Я. Коган. // Труды ВНИИЖТ. – 1967. – №332. – С. 168.

334. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України ЦП-0269/ Наказ Мін. інфраструкт. України від 01 березня 2012 р. № 072-Ц. – К.: Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця, 2012. – 456 с.

335. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України. ЦП-0287/ ВНДУЗ 32.2.04.048-2014 Затверджено наказом Укрзалізниці від 03.11.2014 №470-ЦЗ – К.: Транспорт України, 2015. – 45 с.

336. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірвальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. ЦП-0267 / Затверджено наказом Укрзалізниці № 033-Ц від 01.02.2012 р. – К.: Транспорт України, 2012. – 32 с.

337. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України: ЦП-0266. /Затверджено наказом Укрзалізниці № 033-Ц від 01.02.2012 р. – К.: Транспорт України, 2012. – 57 с.

338. Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм: ЦП-0235. /Затверджено наказом Укрзалізниці № 778-Ц від 14.12.2010 р – К.: Транспорт України, 2010. – 53 с.

339. ДСТУ 7571:2014 Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію шириною 1520 мм Введ. 01-05-15 згідно наказу Мінекономрозвитку №1429 від 02-12-14 (ІПС 12-2014) – К.: Міненергобуд, 2014. – 15 с. – (ІІІ).

340. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С.Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.. – 2013. – №5. – С. 97–104.

341. 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. – №9. – С. 20–24.

342. Адамар Ж. Задачи Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа / Ж. Адамар. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

343. Соболев С. Л. Уравнения математической физики / С. Л. Соболев. – М.: Наука, 1966. – 444 с.

344. Демидов С. П. Теория упругости / С. П. Демидов. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.

345. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 721 с.

346. Кошелев А. И. Механика деформированного твердого тела / А. И. Кошелев, М. А. Нарбут. – СПб: Санкт-Петербург, 2002. – 287 с.

347. Вострухов А. В. Динамика железнодорожного пути с учетом волн в грунте : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.02.06 / Вострухов А. В. – Нижний Новгород, 2001. – 22 с.

348. Суворова Т. В. Динамическое взаимодействие систем полуограниченных и ограниченных деформируемых тел, моделирующих железнодорожный путь и объекты инфраструктуры : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. фіз.-мат. наук : спец. 01.02.04 / суворова Т. В. – Краснодар, 2004. – 319 с.

349. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств связных грунтов – М.: ЦНИИС, 1976. – 70 с.

350. ДБН В.2.1- 10-2009. Основи і фундаменти будівель та споруд. – Введ. 2009–07–01 – К.: Міненергобуд, 2009. – 107 с.

351. Варызгина Е. С. Содержание балластной призмы железнодорожного пути / Е. С. Варызгина. – М.: Транспорт, 1978. – 142 с.

352. Линович Л. Е. Расчет и конструирование частей гражданских зданий / Л. Е. Линович. – К.: Будівельник, 1972. – 664 с.

353. Орлова П. Н. Краткий справочник металлста / П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – М.: Машиностроение, 1986. – 960 с. – (3).

354. Крутиков А. М. Оценка надежности рельсов Р65 по ресурсу / А. М. Крутиков. – Донецк: Світ книги, 2015. – 140 с.

355. Вершинский С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с. – (3)

356. Писаренко Г. С. 358. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К: наук. думка, 1988. – 736 с.

357. Ушкалов В. Ф. Типовые формы изношенных профилей колес / В. Ф. Ушкалов, И. В. Подбельников. // Техническая механика. – 2009. – №1. – С. 50–55.

358. Ушкалов В. Ф. Увеличение ресурса колесных пар за счет использования износостойких профилей колес / В. Ф. Ушкалов, Н. В. Безрукавый. // Техническая механика. – 2015. – №1. – С. 97–103.

359. Лысюк В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов / В. С. Лысюк. – М.: Транспорт, 2002. – 215 с.

360. Коротаев Б. В. Износ термоупрочненных рельсов Р65 в сложных условиях эксплуатации Восточно-Сибирской железной дороги : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.06 / Коротаев Б. В. – Иркутск, 1999. – 22 с.

361. Воробьев А. А. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса / А. А. Воробьев, П. Г. Сорокин. // Новые материалы и технологии в машиностроении : сб. науч. тр. по итогам межд. науч. техн. конф. Брянск : БГИТА. – 2004. – №3. – С. 8–18.

362. Інструкція зі збирання рейко-шпальної решітки для різних видів скріплень. ЦП-0180 : Затв. Наказом Укрзалізниці від 01.11.2007 № 512-Ц / М-во транспорту та зв'язку України. Держадміністрація залізничного транспорту України. Укрзалізниця. НКТБ ЦП УЗ, Д – К.: Швидкий рух, 2007. – 39 с.

363. Ушкалов В. Ф. Разработка рационального профиля головки рельса с несимметричной поверхностью катания / В. Ф. Ушкалов, И. А. Серебряный, И. В. Подбельников. // Техническая механика. – 2008. – №1. – С. 31–37.

364. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм. ВНД 32.0.07.001-2001(Нова редакція ) – К.: Мінтрансп. і зв'язку України, Укрзалізниця, 2011. – 127 с.

365. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар: ЦВ-ЦЛ-0062. – Затв. «Укрзалізниця» 01.04.05 р. – вид. офіц. – К.: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2006. – 102 с.

366. Блохин Е. П. Продольные загрузки при переходных режимах движения поезда / Е. П. Блохин. // Залізничний транспорт України. – 2000. – С. 8–11.

367. Ершова Н.М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами / Н.М. Ершова. - Д.: ПГАСА, 2013. - 272 с.

368. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Д.: Новая идеология, 2002. – 240 с.

369. Сокол Э. Н. Сходы с рельсов и столкновение подвижного состава / Э. Н. Сокол. – Киев: Транспорт Украины, 2004. – 368 с.

370. Вериго М. Ф. Общие положения для корректировки Правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский. // Труды ЦНИИ МПС. – 1972. – №97. – С. 4–50.

371. Гасанов А. А. О приведенной массе пути / А. А. Гасанов. // Весник ЦНИИ МПС. – 1968. – №6. – С. 52–54.

372. Наказ «Про затвердження Правил технічної експлуатації міжгалузевого промислового залізничного транспорту України» від 01.10.2009 № 1014 [Електронний ресурс] // Мінтрансв'язку України. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z1166-09>.

373. Rail and Contact Line Inspection Technology for Safe and Reliable Railway Traffic / Т. Hisa, М. Kanaya, М. Sakai, К. Намаока. // 61. – 2012. – №7. – С. 325–330.

374. Державний стандарт України ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення; надано чинності 1994-12-28 – К.: Держстандарт України, 1995. – 91 с.

375. Державний стандарт України ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення; надано чинності 1994-12-08 – К.: Держстандарт України, 1995. – 33 с.

376. Державний стандарт України ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги; надано чинності 1994-12-08 – К.: Держстандарт України, 1995. – 39 с.

377. Державний стандарт України ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення; надано чинності 1994-12-08 – К.: Держстандарт України, 1995. – 32 с.

378. Державний стандарт України ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними; надано чинності 1995-01-22 – К.: Держстандарт України, 1995. – 124 с.

379. ДБН В.2.3-19-2008. Споруди транспорту залізничної колії 1520 мм. – Введ. 2008 –01–26 – К.: Міненергобуд, 2008. – 151 с.

380. Державний стандарт України ДСТУ 4344:2004 Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови; надано чинності 2005-10-01 – К.: Держстандарт України, 2005. – 71 с.

381. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів на залізницях України. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України ЦП-0284/ Наказ Мін. інфраструкт. України від 27 лютого 2013 р. № 050-Ц. – К. – К.: Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця, 2013. – 194 с.

382. Інструкція зі складання та поточного утримання колії зі скріпленнями типу СКД65 ЦП-0199/ Наказ Мін. інфраструкт. України від 10 грудня 2008 р. № 534-Ц. – К.: Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця, 2009. – 44 с.

383. Технічні вказівки щодо проведення вхідного контролю приймання матеріалів верхньої будови колії ЦП-0192/ Наказ Мін. інфраструкт. України від 16 серпня 2008 р. № 328-Ц. – К.: Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця, 2008. – 90 с.

384.40 25ГОСТ 78-2004. Шпалы деревянные для железных дорог рельсовой колеи. – Введ. 2004–05–26 – М.: Издательство стандартов, 2004. – 8 с.

385.ГОСТ 7392-85. Щебень из природного камня для балластного слоя железнодорожного пути. – Введ. 1986–01–01 – М.: Издательство стандартов, 1986. – 8 с.

386.ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация. – Введ. 1995–04–19 – М.: Издательство стандартов, 1995. – 32 с.

387.Інструкції з утримання земляного полотна залізниць України ЦП-0072/ Наказ Укрзалізниці від 08 травня 2001 р. № 256-Ц. – К.: Мінтрансп. і зв'язку України, Укрзалізниця, 2001. – 104 с.

388.СН 449-72 Указания по проектированию земляного полотна железных и автомобильных дорог. – Введ. 1972–12–29 – М.: Стойиздат, 1983. – 114 с.

389.Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії ЦП-0236/ Наказ Укрзалізниці від 14 грудня 2010 р. № 778-Ц. – К.: Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця, 2010. – 52 с.

390.Правила технічної експлуатації залізниць України – К.: Транспорт, 2003. – 133 с. – (Міністерство транспорту України).

391.Бесстыковой путь и длинные рельсы / В. Г.Альбрехт, В. Н. Лященко, С. П. Першин, В. Я. Шульга. – М.: Транспорт, 1963. – 214 с.

ДОДАТКИ

## Додаток А

Таблиця А.1

**Якісна оцінка деформативності колії за модулями пружності підрейкової основи для різних конструкцій колії**

Тип рейок	Рід баласту	Товщина бал., см	Тип и еюра шпал, тип скріплення	Відмінно	Добре	Задовільно	Незадовільно
1	2	3	4	5	6	7	8
Р65/УІС60 Р50	щебінь	25	ІА, ІБ, 1840	$30,4 \leq U < 62,4$	$16,8 \leq U < 30,4$	$8,8 \leq U < 16,8$ $U''_{\max\delta on} \geq 62,4$	$U^I_{\min\delta on} < 8,8$
			ІА, ІБ, 1600	$29,8 \leq U < 60,8$	$16,5 \leq U < 29,8$	$8,6 \leq U < 16,5$ $U''_{\max\delta on} \geq 60,8$	$U^I_{\min\delta on} < 8,6$
			ІА, ІБ, 2000	$31,0 \leq U < 63,6$	$17,1 \leq U < 31,0$	$9,0 \leq U < 17,1$ $U''_{\max\delta on} \geq 63,6$	$U^I_{\min\delta on} < 9,0$
Р65/УІС60	щебінь	30	ІА, ІБ, 1600	$30,6 \leq U < 62,7$	$16,9 \leq U < 30,6$	$9,2 \leq U < 16,9$ $U''_{\max\delta on} \geq 62,7$	$U^I_{\min\delta on} < 9,2$
			ІА, ІБ, 1840	$31,2 \leq U < 64$	$17,2 \leq U < 31,2$	$9,0 \leq U < 17,2$ $U''_{\max\delta on} \geq 64$	$U^I_{\min\delta on} < 9,0$
			ІА, ІБ, 2000	$31,8 \leq U < 65,3$	$17,5 \leq U < 31,8$	$9,2 \leq U < 17,5$ $U''_{\max\delta on} \geq 65,3$	$U^I_{\min\delta on} < 9,2$
Р65/УІС60	щебінь	35	ІА, ІБ, 1600	$32,4 \leq U < 66,5$	$17,9 \leq U < 32,4$	$9,4 \leq U < 17,9$ $U''_{\max\delta on} \geq 66,5$	$U^I_{\min\delta on} < 9,4$
			ІА, ІБ, 1840	$33,1 \leq U < 67,9$	$18,3 \leq U < 33,1$	$9,6 \leq U < 18,3$ $U''_{\max\delta on} \geq 67,9$	$U^I_{\min\delta on} < 9,6$
			ІА, ІБ, 2000	$33,8 \leq U < 69,3$	$18,7 \leq U < 33,8$	$9,8 \leq U < 18,7$ $U''_{\max\delta on} \geq 69,3$	$U^I_{\min\delta on} < 9,8$

## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
P65/UIC60	щебінь	40	ІА, ІБ, 1600	$37,2 \leq U < 76,4$	$20,6 \leq U < 37,2$	$10,8 \leq U < 20,6$ $U''_{\max\delta on} \geq 76,4$	$U^I_{\min\delta on} < 10,8$
			ІА, ІБ, 1840	$38,0 \leq U < 78,0$	$21,0 \leq U < 38,0$	$11,0 \leq U < 21,0$ $U''_{\max\delta on} \geq 78,0$	$U^I_{\min\delta on} < 11,0$
			ІА, ІБ, 2000	$38,8 \leq U < 79,6$	$21,4 \leq U < 38,8$	$11,2 \leq U < 21,73$ $U''_{\max\delta on} \geq 79,6$	$U^I_{\min\delta on} < 11,2$
P65/UIC60	щебінь	25	Ж/б 1600, КБ	$36,1 \leq U < 55,7$	$17,3 \leq U < 36,1$	$9,4 \leq U < 17,3$ $U''_{\max\delta on} \geq 55,7$	$U^I_{\min\delta on} < 9,4$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.1	$38,6 \leq U < 59,64$	$18,5 \leq U < 38,6$	$10,0 \leq U < 18,5$ $U''_{\max\delta on} \geq 59,6$	$U^I_{\min\delta on} < 10,0$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.3	$46,8 \leq U < 72,1$	$22,4 \leq U < 46,8$	$12,2 \leq U < 22,4$ $U''_{\max\delta on} \geq 72,1$	$U^I_{\min\delta on} < 12,2$
			Ж/б 1840, КБ	$36,8 \leq U < 56,8$	$17,6 \leq U < 36,8$	$9,6 \leq U < 17,6$ $U''_{\max\delta on} \geq 56,8$	$U^I_{\min\delta on} < 9,6$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.1	$39,4 \leq U < 60,8$	$18,8 \leq U < 39,4$	$10,3 \leq U < 18,8$ $U''_{\max\delta on} \geq 60,8$	$U^I_{\min\delta on} < 10,3$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.3	$47,8 \leq U < 73,8$	$22,9 \leq U < 47,8$	$12,5 \leq U < 22,9$ $U''_{\max\delta on} \geq 73,8$	$U^I_{\min\delta on} < 12,5$
P65/UIC60	щебінь	30	Ж/б 1600, КБ	$37,0 \leq U < 57,0$	$17,7 \leq U < 37,0$	$9,6 \leq U < 17,7$ $U''_{\max\delta on} \geq 57,0$	$U^I_{\min\delta on} < 9,6$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.1	$39,6 \leq U < 61,1$	$19,0 \leq U < 39,6$	$10,3 \leq U < 19,0$ $U''_{\max\delta on} \geq 61,1$	$U^I_{\min\delta on} < 10,3$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.3	$47,9 \leq U < 73,9$	$22,9 \leq U < 47,9$	$12,5 \leq U < 22,9$ $U''_{\max\delta on} \geq 73,9$	$U^I_{\min\delta on} < 12,5$
			Ж/б 1840, КБ	$37,7 \leq U < 58,2$	$18,1 \leq U < 37,7$	$9,8 \leq U < 18,1$ $U''_{\max\delta on} \geq 58,2$	$U^I_{\min\delta on} < 9,8$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.1	$40,3 \leq U < 62,3$	$19,4 \leq U < 40,3$	$10,5 \leq U < 19,4$ $U''_{\max\delta on} \geq 62,3$	$U^I_{\min\delta on} < 10,5$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.3	$49,0 \leq U < 75,7$	$23,5 \leq U < 49,0$	$12,7 \leq U < 23,5$ $U''_{\max\delta on} \geq 75,7$	$U^I_{\min\delta on} < 12,7$

Закінчення таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
P65/UIC60	щебінь	35	Ж/б 1600, КБ	$39,2 \leq U < 60,6$	$18,7 \leq U < 39,2$	$10,2 \leq U < 18,7$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 60,6$	$U^I_{\min \delta on} < 10,2$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.1	$42,0 \leq U < 64,9$	$20,1 \leq U < 42,0$	$10,9 \leq U < 20,1$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 64,9$	$U^I_{\min \delta on} < 10,9$
P65/UIC60	щебінь	35	Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.3	$50,8 \leq U < 78,5$	$24,3 \leq U < 50,8$	$13,2 \leq U < 24,3$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 78,5$	$U^I_{\min \delta on} < 13,2$
			Ж/б 1840, КБ	$40,0 \leq U < 61,8$	$19,1 \leq U < 40,0$	$10,4 \leq U < 19,1$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 61,8$	$U^I_{\min \delta on} < 10,4$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.1	$42,8 \leq U < 66,1$	$20,4 \leq U < 42,8$	$11,1 \leq U < 20,4$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 66,1$	$U^I_{\min \delta on} < 11,1$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.3	$52,0 \leq U < 80,3$	$24,8 \leq U < 52,0$	$13,5 \leq U < 24,8$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 80,3$	$U^I_{\min \delta on} < 13,5$
P65/UIC60	щебінь	40	Ж/б 1600, КБ	$45,1 \leq U < 69,6$	$21,6 \leq U < 45,1$	$11,8 \leq U < 21,6$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 69,6$	$U^I_{\min \delta on} < 11,8$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.1	$48,3 \leq U < 74,5$	$23,1 \leq U < 48,3$	$11,7 \leq U < 23,1$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 74,5$	$U^I_{\min \delta on} < 11,7$
			Ж/б 1600, КПП, ПРП-2.3	$58,4 \leq U < 90,2$	$27,9 \leq U < 58,4$	$15,2 \leq U < 27,9$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 90,2$	$U^I_{\min \delta on} < 15,2$
			Ж/б 1840, КБ	$46,0 \leq U < 71,0$	$22,0 \leq U < 46,0$	$12,0 \leq U < 22,0$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 71,0$	$U^I_{\min \delta on} < 12,0$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.1	$49,2 \leq U < 75,9$	$23,5 \leq U < 49,2$	$12,8 \leq U < 23,5$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 75,9$	$U^I_{\min \delta on} < 12,8$
			Ж/б 1840, КПП, ПРП-2.3	$59,8 \leq U < 92,3$	$28,6 \leq U < 59,8$	$15,6 \leq U < 28,6$ $U^{II}_{\max \delta on} \geq 92,3$	$U^I_{\min \delta on} < 15,6$

Таблиця А.2

## Рекомендації щодо якісної оцінки деформативності відповідно категоріям колії

Категорія	Якісна оцінка деформативності колії			
	Відмінно	Добре	Задовільно	Незадовільно
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
I, II категорії	$46 \leq U < 76$	$22 \leq U < 46$	$12 \leq U < 22$ $U \geq 76$	$U < 13$
III категорія	$40 \leq U < 66$	$19 \leq U < 40$	$11 \leq U < 19$ $U \geq 66$	$U < 11$
IV категорія	$38 \leq U < 62$	$18 \leq U < 38$	$10 \leq U < 18$ $U \geq 62$	$U < 10$
V, VI, VII категорії	$36 \leq U < 60$	$18 \leq U < 36$	$10 \leq U < 18$ $U \geq 60$	$U < 10$

Додаток Б. Характеристики взаємодії колісної пари з рейками

Таблиця Б.1

Параметри контакту взаємодії колісної пари з рейками

S, мм	h, мм	T, мм			g, мм			d, мм			rс, мм				w, с <sup>-1</sup>			
		норм.	max	min	норм.	max	min	норм.	min	max	н.р.	норм.	max	min	н.р.	норма.	max	min
1512	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	4	1	7	475	476,7	476,625	476,775	0,373145	0,372479	0,372508	0,372449
1516	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	8	5	11	475	476,6	476,525	476,675	0,372652	0,372026	0,372055	0,371997
1520	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	12	9	15	475	476,5	476,425	476,575	0,372161	0,371575	0,371604	0,371546
1528	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	20	17	23	475	476,3	476,225	476,375	0,371186	0,370679	0,370708	0,37065
1530	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	22	19	25	475	476,25	476,175	476,325	0,370943	0,370456	0,370485	0,370427
1535	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	27	24	30	475	476,125	476,05	476,2	0,370339	0,369901	0,36993	0,369872
1540	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	32	29	35	475	476	475,925	476,075	0,369737	0,369348	0,369377	0,369319
1545	33	1440	1443	1437	1508	1511	1505	37	34	40	475	475,875	475,8	475,95	0,369138	0,368799	0,368828	0,36877
1512	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	8	5	11	475	476,6	476,525	476,675	0,373145	0,372518	0,372547	0,372489
1516	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	12	9	15	475	476,5	476,425	476,575	0,372652	0,372065	0,372094	0,372036
1520	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	16	13	19	475	476,4	476,325	476,475	0,372161	0,371614	0,371643	0,371585
1528	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	24	21	27	475	476,2	476,125	476,275	0,371186	0,370718	0,370747	0,370689
1530	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	26	23	29	475	476,15	476,075	476,225	0,370943	0,370495	0,370524	0,370466
1535	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	31	28	34	475	476,025	475,95	476,1	0,370339	0,36994	0,369969	0,369911
1540	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	36	33	39	475	475,9	475,825	475,975	0,369737	0,369387	0,369416	0,369358
1545	31	1440	1443	1437	1504	1507	1501	41	38	44	475	475,775	475,7	475,85	0,369138	0,368837	0,368866	0,368808
1512	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	12	9	15	475	476,5	476,425	476,575	0,373145	0,372557	0,372586	0,372528
1516	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	16	13	19	475	476,4	476,325	476,475	0,372652	0,372104	0,372133	0,372075
1520	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	20	17	23	475	476,3	476,225	476,375	0,372161	0,371653	0,371682	0,371624
1528	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	28	25	31	475	476,1	476,025	476,175	0,371186	0,370757	0,370786	0,370728
1530	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	30	27	33	475	476,05	475,975	476,125	0,370943	0,370534	0,370563	0,370505
1535	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	35	32	38	475	475,925	475,85	476	0,370339	0,369979	0,370008	0,369949
1540	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	40	37	43	475	475,8	475,725	475,875	0,369737	0,369426	0,369455	0,369397
1545	29	1440	1443	1437	1500	1503	1497	45	42	48	475	475,675	475,6	475,75	0,369138	0,368876	0,368905	0,368847

Закінчення табл. Б.1

S, мм	h, мм	T, мм			g, мм			d, мм			rc, мм				w, с <sup>-1</sup>			
		норм.	max	min	норм.	max	min	норм.	min	max	н.р.	норм.	max	min	н.р.	норма.	max	min
1512	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	16	13	19	475	476,4	476,325	476,475	0,373145	0,372596	0,372625	0,372567
1516	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	20	17	23	475	476,3	476,225	476,375	0,372652	0,372143	0,372173	0,372114
1520	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	24	21	27	475	476,2	476,125	476,275	0,372161	0,371692	0,371722	0,371663
1528	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	32	29	35	475	476	475,925	476,075	0,371186	0,370796	0,370825	0,370767
1530	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	34	31	37	475	475,95	475,875	476,025	0,370943	0,370573	0,370602	0,370544
1535	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	39	36	42	475	475,825	475,75	475,9	0,370339	0,370017	0,370047	0,369988
1540	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	44	41	47	475	475,7	475,625	475,775	0,369737	0,369465	0,369494	0,369436
1545	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	49	46	52	475	475,575	475,5	475,65	0,369138	0,368915	0,368944	0,368886
1512	27	1440	1443	1437	1496	1499	1493	16	13	19	475	476,4	476,325	476,475	0,373145	0,372596	0,372625	0,372567
1516	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	24	21	27	475	476,2	476,125	476,275	0,372652	0,372182	0,372212	0,372153
1520	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	28	25	31	475	476,1	476,025	476,175	0,372161	0,371731	0,371761	0,371702
1528	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	36	33	39	475	475,9	475,825	475,975	0,371186	0,370835	0,370864	0,370806
1530	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	38	35	41	475	475,85	475,775	475,925	0,370943	0,370612	0,370641	0,370583
1535	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	43	40	46	475	475,725	475,65	475,8	0,370339	0,370056	0,370085	0,370027
1540	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	48	45	51	475	475,6	475,525	475,675	0,369737	0,369504	0,369533	0,369475
1545	25	1440	1443	1437	1492	1495	1489	53	50	56	475	475,475	475,4	475,55	0,369138	0,368954	0,368983	0,368925

В табл. 4.1 наведені значення для нових рейок (н.р.) та для зношених.

Таблиця Б.2

## Параметри контакту взаємодії колісної пари з рейками

S, мм	h, мм	δ, мм			L, м				R, м при $u_R = \delta/2$			
		норм.	min	max	н.р.	норм.	max	min	н.р.	норм.	min	max
1512	33	4	1	7	16,83847	16,869	16,867	16,870	3591	3604	2060	14418
1516	33	8	5	11	16,86073	16,889	16,888	16,890	1801	1807	1314	2891
1520	33	12	9	15	16,88296	16,910	16,908	16,911	1204	1208	966	1610
1528	33	20	17	23	16,92733	16,950	16,949	16,952	726	728	633	857
1530	33	22	19	25	16,9384	16,961	16,959	16,962	661	663	583	768
1535	33	27	24	30	16,96605	16,986	16,985	16,987	541	542	488	610
1540	33	32	29	35	16,99366	17,012	17,010	17,013	458	459	419	506
1545	33	37	34	40	17,02123	17,037	17,036	17,038	397	398	368	433
1512	31	8	5	11	16,83847	16,867	16,865	16,868	1796	1802	1311	2883
1516	31	12	9	15	16,86073	16,887	16,886	16,889	1201	1204	964	1606
1520	31	16	13	19	16,88296	16,908	16,906	16,909	903	906	763	1115
1528	31	24	21	27	16,92733	16,949	16,947	16,950	605	607	539	694
1530	31	26	23	29	16,9384	16,959	16,958	16,960	560	561	503	634
1535	31	31	28	34	16,96605	16,984	16,983	16,986	471	472	430	523
1540	31	36	33	39	16,99366	17,010	17,008	17,011	407	408	376	445
1545	31	41	38	44	17,02123	17,035	17,034	17,036	358	359	335	387
1512	29	12	9	15	16,83847	16,865	16,864	16,866	1197	1201	961	1602
1516	29	16	13	19	16,86073	16,886	16,884	16,887	901	903	761	1112
1520	29	20	17	23	16,88296	16,906	16,905	16,907	722	724	630	852
1528	29	28	25	31	16,92733	16,947	16,946	16,948	519	520	470	583
1530	29	30	27	33	16,9384	16,957	16,956	16,958	485	486	442	540
1535	29	35	32	38	16,96605	16,983	16,981	16,984	417	418	385	457
1540	29	40	37	43	16,99366	17,008	17,007	17,009	366	367	341	397
1545	29	45	42	48	17,02123	17,033	17,032	17,035	327	327	307	351
1512	27	16	13	19	16,83847	16,863	16,862	16,865	898	901	759	1109
1516	27	20	17	23	16,86073	16,884	16,882	16,885	721	723	628	850
1520	27	24	21	27	16,88296	16,904	16,903	16,906	602	604	537	690
1528	27	32	29	35	16,92733	16,945	16,944	16,946	454	455	416	502
1530	27	34	31	37	16,9384	16,955	16,954	16,957	428	429	394	470
1535	27	39	36	42	16,96605	16,981	16,979	16,982	374	375	348	406
1540	27	44	41	47	16,99366	17,006	17,005	17,008	333	333	312	358
1545	27	49	46	52	17,02123	17,032	17,030	17,033	300	300	283	320
1512	25	20	17	23	16,83847	16,861	16,860	16,863	719	721	627	848
1516	25	24	21	27	16,86073	16,882	16,881	16,883	601	602	535	688
1520	25	28	25	31	16,88296	16,902	16,901	16,904	516	517	467	580
1528	25	36	33	39	16,92733	16,943	16,942	16,945	404	404	373	441
1530	25	38	35	41	16,9384	16,954	16,952	16,955	383	384	356	417
1535	25	43	40	46	16,96605	16,979	16,978	16,980	340	340	318	366
1540	25	48	45	51	16,99366	17,004	17,003	17,006	305	306	288	326
1545	25	53	50	56	17,02123	17,030	17,028	17,031	277	278	263	294

Таблиця Б.3

## Параметри контакту взаємодії колісної пари з рейками

R, м	d, мм					S, мм	yR					y/2					%yR				
	26	30	35	40	44		24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	93,4	80,9	69,3	60,7	55,1
300	26	30	35	40	44	1530,0	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	93,4	80,9	69,3	60,7	55,1
350	26	30	35	40	44	1530,0	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	80,1	69,4	59,4	52,0	47,3
400	26	30	35	40	44	1530,0	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	0,0	0,0	0,0	1,8	3,8	70,0	60,7	52,0	45,5	41,4
450	26	30	35	40	44	1530,0	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	0,0	0,0	1,3	3,8	5,8	62,3	54,0	46,2	40,4	36,8
500	26	30	35	40	44	1530,0	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	0,0	0,4	2,9	5,4	7,4	56,0	48,6	41,6	36,4	33,1
550	26	30	35	40	44	1530,0	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	0,0	1,8	4,3	6,8	8,8	50,9	44,1	37,8	33,1	30,1
600	26	30	35	40	44	1530,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	0,9	2,9	5,4	7,9	9,9	46,7	40,5	34,7	30,3	27,6
650	26	30	35	40	44	1530,0	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	1,8	3,8	6,3	8,8	10,8	43,1	37,4	32,0	28,0	25,4
700	26	30	35	40	44	1530,0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	2,6	4,6	7,1	9,6	11,6	40,0	34,7	29,7	26,0	23,6
800	26	30	35	40	44	1530,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	3,9	5,9	8,4	10,9	12,9	35,0	30,3	26,0	22,7	20,7
900	26	30	35	40	44	1530,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	4,9	6,9	9,4	11,9	13,9	31,1	27,0	23,1	20,2	18,4
1000	26	30	35	40	44	1530,0	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	5,7	7,7	10,2	12,7	14,7	28,0	24,3	20,8	18,2	16,5
1100	26	30	35	40	44	1530,0	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,4	8,4	10,9	13,4	15,4	25,5	22,1	18,9	16,5	15,0
1200	26	30	35	40	44	1530,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,9	8,9	11,4	13,9	15,9	23,3	20,2	17,3	15,2	13,8
1300	26	30	35	40	44	1530,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	7,4	9,4	11,9	14,4	16,4	21,6	18,7	16,0	14,0	12,7
1400	26	30	35	40	44	1530,0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	7,8	9,8	12,3	14,8	16,8	20,0	17,3	14,9	13,0	11,8
1500	26	30	35	40	44	1530,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	8,1	10,1	12,6	15,1	17,1	18,7	16,2	13,9	12,1	11,0
300	26	30	35	40	44	1535,0	24,4	24,4	24,4	24,3	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	93,7	81,2	69,6	60,9	55,3
350	26	30	35	40	44	1535,0	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	80,3	69,6	59,6	52,2	47,4
400	26	30	35	40	44	1535,0	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	0,0	0,0	0,0	1,7	3,7	70,3	60,9	52,2	45,6	41,5
450	26	30	35	40	44	1535,0	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	0,0	0,0	1,3	3,8	5,8	62,5	54,1	46,4	40,6	36,9
500	26	30	35	40	44	1535,0	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	0,0	0,4	2,9	5,4	7,4	56,2	48,7	41,7	36,5	33,2
550	26	30	35	40	44	1535,0	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	0,0	1,7	4,2	6,7	8,7	51,1	44,3	38,0	33,2	30,2
600	26	30	35	40	44	1535,0	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	0,8	2,8	5,3	7,8	9,8	46,9	40,6	34,8	30,4	27,7
650	26	30	35	40	44	1535,0	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	1,8	3,8	6,3	8,8	10,8	43,2	37,5	32,1	28,1	25,5
700	26	30	35	40	44	1535,0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	2,6	4,6	7,1	9,6	11,6	40,2	34,8	29,8	26,1	23,7
800	26	30	35	40	44	1535,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	3,9	5,9	8,4	10,9	12,9	35,1	30,4	26,1	22,8	20,7
900	26	30	35	40	44	1535,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	4,9	6,9	9,4	11,9	13,9	31,2	27,1	23,2	20,3	18,4

1000	26	30	35	40	44	1535,0	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	5,7	7,7	10,2	12,7	14,7	28,1	24,4	20,9	18,3	16,6
------	----	----	----	----	----	--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

304

Продовження табл. Б.3

R, м	d, мм					S, мм	yR					y/2					%yR				
	26	30	35	40	44		6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,4	8,4	10,9	13,4	15,4	25,6	22,1	19,0	16,6	15,1
1100	26	30	35	40	44	1535,0	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,4	8,4	10,9	13,4	15,4	25,6	22,1	19,0	16,6	15,1
1200	26	30	35	40	44	1535,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,9	8,9	11,4	13,9	15,9	23,4	20,3	17,4	15,2	13,8
1300	26	30	35	40	44	1535,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	7,4	9,4	11,9	14,4	16,4	21,6	18,7	16,1	14,0	12,8
1400	26	30	35	40	44	1535,0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	7,8	9,8	12,3	14,8	16,8	20,1	17,4	14,9	13,0	11,9
1500	26	30	35	40	44	1535,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	8,1	10,1	12,6	15,1	17,1	18,7	16,2	13,9	12,2	11,1
300	26	30	35	40	44	1540,0	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,0	81,5	69,8	61,1	55,5
400	26	30	35	40	44	1540,0	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	0,0	0,0	0,0	1,7	3,7	70,5	61,1	52,4	45,8	41,6
500	26	30	35	40	44	1540,0	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	0,0	0,3	2,8	5,3	7,3	56,4	48,9	41,9	36,6	33,3
600	26	30	35	40	44	1540,0	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	0,8	2,8	5,3	7,8	9,8	47,0	40,7	34,9	30,5	27,7
700	26	30	35	40	44	1540,0	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	2,5	4,5	7,0	9,5	11,5	40,3	34,9	29,9	26,2	23,8
800	26	30	35	40	44	1540,0	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	3,8	5,8	8,3	10,8	12,8	35,3	30,5	26,2	22,9	20,8
900	26	30	35	40	44	1540,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	4,9	6,9	9,4	11,9	13,9	31,3	27,2	23,3	20,4	18,5
1000	26	30	35	40	44	1540,0	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	5,7	7,7	10,2	12,7	14,7	28,2	24,4	20,9	18,3	16,6
1100	26	30	35	40	44	1540,0	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,3	8,3	10,8	13,3	15,3	25,6	22,2	19,0	16,7	15,1
1200	26	30	35	40	44	1540,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,9	8,9	11,4	13,9	15,9	23,5	20,4	17,5	15,3	13,9
1300	26	30	35	40	44	1540,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	7,4	9,4	11,9	14,4	16,4	21,7	18,8	16,1	14,1	12,8
1400	26	30	35	40	44	1540,0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	7,8	9,8	12,3	14,8	16,8	20,1	17,5	15,0	13,1	11,9
1500	26	30	35	40	44	1540,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	8,1	10,1	12,6	15,1	17,1	18,8	16,3	14,0	12,2	11,1
300	36	40	42	45	49	1540,0	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	67,9	61,1	58,1	54,3	49,8
350	36	40	42	45	49	1540,0	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	0,0	0,0	0,1	1,6	3,6	58,2	52,3	49,8	46,5	42,7
400	36	40	42	45	49	1540,0	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	0,0	1,7	2,7	4,2	6,2	50,9	45,8	43,6	40,7	37,4
450	36	40	42	45	49	1540,0	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	1,7	3,7	4,7	6,2	8,2	45,2	40,7	38,8	36,2	33,2
500	36	40	42	45	49	1540,0	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6	3,3	5,3	6,3	7,8	9,9	40,7	36,6	34,9	32,6	29,9
550	36	40	42	45	49	1540,0	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	4,7	6,7	7,7	9,2	11,2	37,0	33,3	31,7	29,6	27,2
600	36	40	42	45	49	1540,0	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	5,8	7,8	8,8	10,3	12,3	33,9	30,5	29,1	27,1	24,9
650	36	40	42	45	49	1540,0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	6,7	8,7	9,7	11,2	13,2	31,3	28,2	26,8	25,0	23,0
700	36	40	42	45	49	1540,0	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	7,5	9,5	10,5	12,0	14,0	29,1	26,2	24,9	23,3	21,4
800	36	40	42	45	49	1540,0	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	8,8	10,8	11,8	13,3	15,3	25,4	22,9	21,8	20,3	18,7
900	36	40	42	45	49	1540,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	9,9	11,9	12,9	14,4	16,4	22,6	20,4	19,4	18,1	16,6
1000	36	40	42	45	49	1540,0	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	10,7	12,7	13,7	15,2	17,2	20,4	18,3	17,4	16,3	14,9

305

1100	36	40	42	45	49	1540,0	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	11,3	13,3	14,3	15,8	17,8	18,5	16,7	15,9	14,8	13,6
------	----	----	----	----	----	--------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Продовження табл. Б.3

R, м	d, мм					S, мм	yR					y/2					%yR				
1200	36	40	42	45	49	1540,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	11,9	13,9	14,9	16,4	18,4	17,0	15,3	14,5	13,6	12,5
1300	36	40	42	45	49	1540,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	12,4	14,4	15,4	16,9	18,9	15,7	14,1	13,4	12,5	11,5
1400	36	40	42	45	49	1540,0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	12,8	14,8	15,8	17,3	19,3	14,5	13,1	12,5	11,6	10,7
1500	36	40	42	45	49	1540,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	13,1	15,1	16,1	17,6	19,6	13,6	12,2	11,6	10,9	10,0
1600	36	40	42	45	49	1540,0	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	13,4	15,4	16,4	17,9	19,9	12,7	11,4	10,9	10,2	9,3
1700	36	40	42	45	49	1540,0	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	13,7	15,7	16,7	18,2	20,2	12,0	10,8	10,3	9,6	8,8
300	36	40	42	45	49	1545,0	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	68,1	61,3	58,3	54,4	50,0
350	36	40	42	45	49	1545,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	0,0	0,0	0,0	1,5	3,5	58,4	52,5	50,0	46,7	42,8
400	36	40	42	45	49	1545,0	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	0,0	1,6	2,6	4,1	6,1	51,1	45,9	43,8	40,8	37,5
450	36	40	42	45	49	1545,0	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	1,7	3,7	4,7	6,2	8,2	45,4	40,8	38,9	36,3	33,3
500	36	40	42	45	49	1545,0	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	3,3	5,3	6,3	7,8	9,8	40,8	36,8	35,0	32,7	30,0
550	36	40	42	45	49	1545,0	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	4,6	6,6	7,6	9,1	11,1	37,1	33,4	31,8	29,7	27,3
600	36	40	42	45	49	1545,0	12,3	12,3	12,3	12,2	12,2	5,7	7,7	8,7	10,3	12,3	34,0	30,6	29,2	27,2	25,0
650	36	40	42	45	49	1545,0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	6,7	8,7	9,7	11,2	13,2	31,4	28,3	26,9	25,1	23,1
700	36	40	42	45	49	1545,0	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	7,5	9,5	10,5	12,0	14,0	29,2	26,3	25,0	23,3	21,4
300	8	12	18	20	24	1516,0	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	301,1	200,7	133,7	120,3	100,3
400	8	12	18	20	24	1516,0	18,1	18,1	18,1	18,1	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	225,8	150,5	100,3	90,3	75,2
500	8	12	18	20	24	1516,0	14,5	14,4	14,4	14,4	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	180,6	120,4	80,2	72,2	60,2
600	8	12	18	20	24	1516,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	150,5	100,3	66,9	60,2	50,1
700	8	12	18	20	24	1516,0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	129,0	86,0	57,3	51,6	43,0
750	8	12	18	20	24	1516,0	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	0,0	0,0	0,0	0,4	2,4	120,4	80,3	53,5	48,1	40,1
800	8	12	18	20	24	1516,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,0	112,9	75,2	50,1	45,1	37,6
850	8	12	18	20	24	1516,0	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	0,0	0,0	0,5	1,5	3,5	106,3	70,8	47,2	42,5	35,4
900	8	12	18	20	24	1516,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	0,0	0,0	1,0	2,0	4,0	100,4	66,9	44,6	40,1	33,4
950	8	12	18	20	24	1516,0	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	0,0	0,0	1,4	2,4	4,4	95,1	63,4	42,2	38,0	31,7
1000	8	12	18	20	24	1516,0	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	0,0	0,0	1,8	2,8	4,8	90,3	60,2	40,1	36,1	30,1
1050	8	12	18	20	24	1516,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	0,0	0,0	2,1	3,1	5,1	86,0	57,3	38,2	34,4	28,6
1100	8	12	18	20	24	1516,0	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	0,0	0,0	2,4	3,4	5,4	82,1	54,7	36,5	32,8	27,3
1150	8	12	18	20	24	1516,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	0,0	0,0	2,7	3,7	5,7	78,5	52,3	34,9	31,4	26,2
1200	8	12	18	20	24	1516,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0	0,0	3,0	4,0	6,0	75,3	50,2	33,4	30,1	25,1

1250	8	12	18	20	24	1516,0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,0	0,2	3,2	4,2	6,2	72,3	48,2	32,1	28,9	24,1
------	---	----	----	----	----	--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Продовження табл. Б.3

R, м	d, мм					S, мм	yR					y/2					%yR				
	8	12	18	20	24		5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	0,0	0,4	3,4	4,4	6,4	69,5	46,3	30,9	27,8	23,1
1300	8	12	18	20	24	1516,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	0,0	0,4	3,4	4,4	6,4	69,5	46,3	30,9	27,8	23,1
1500	8	12	18	20	24	1516,0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	0,0	1,2	4,2	5,2	7,2	60,2	40,1	26,7	24,1	20,1
300	12	14	18	20	24	1520,0	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	201,2	172,4	134,1	120,7	100,5
400	12	14	18	20	24	1520,0	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	150,9	129,3	100,6	90,5	75,4
500	12	14	18	20	24	1520,0	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	120,7	103,5	80,5	72,4	60,3
600	12	14	18	20	24	1520,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,6	86,2	67,0	60,3	50,3
700	12	14	18	20	24	1520,0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	86,2	73,9	57,5	51,7	43,1
750	12	14	18	20	24	1520,0	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	0,0	0,0	0,0	0,3	2,3	80,5	69,0	53,6	48,3	40,2
800	12	14	18	20	24	1520,0	9,1	9,1	9,1	9,0	9,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,0	75,4	64,7	50,3	45,2	37,7
850	12	14	18	20	24	1520,0	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	0,0	0,0	0,5	1,5	3,5	71,0	60,9	47,3	42,6	35,5
900	12	14	18	20	24	1520,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	0,0	0,0	1,0	2,0	4,0	67,1	57,5	44,7	40,2	33,5
950	12	14	18	20	24	1520,0	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	0,0	0,0	1,4	2,4	4,4	63,5	54,5	42,3	38,1	31,7
1000	12	14	18	20	24	1520,0	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	0,0	0,0	1,8	2,8	4,8	60,4	51,7	40,2	36,2	30,2
1050	12	14	18	20	24	1520,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	0,0	0,1	2,1	3,1	5,1	57,5	49,3	38,3	34,5	28,7
1100	12	14	18	20	24	1520,0	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	0,0	0,4	2,4	3,4	5,4	54,9	47,0	36,6	32,9	27,4
1150	12	14	18	20	24	1520,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	0,0	0,7	2,7	3,7	5,7	52,5	45,0	35,0	31,5	26,2
1200	12	14	18	20	24	1520,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0	1,0	3,0	4,0	6,0	50,3	43,1	33,5	30,2	25,1
1250	12	14	18	20	24	1520,0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,2	1,2	3,2	4,2	6,2	48,3	41,4	32,2	29,0	24,1
1300	12	14	18	20	24	1520,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	0,4	1,4	3,4	4,4	6,4	46,4	39,8	30,9	27,8	23,2
700	12	14	18	20	24	1528,0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	86,7	74,3	57,8	52,0	43,3
750	12	14	18	20	24	1528,0	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	0,0	0,0	0,0	0,3	2,3	80,9	69,3	53,9	48,5	40,4
800	12	14	18	20	24	1528,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	0,0	0,0	0,0	0,9	2,9	75,8	65,0	50,5	45,5	37,9
850	12	14	18	20	24	1528,0	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	0,0	0,0	0,4	1,4	3,4	71,4	61,2	47,6	42,8	35,7
900	12	14	18	20	24	1528,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	0,0	0,0	0,9	1,9	3,9	67,4	57,8	44,9	40,4	33,7
950	12	14	18	20	24	1528,0	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	0,0	0,0	1,3	2,3	4,3	63,9	54,7	42,6	38,3	31,9
1000	12	14	18	20	24	1528,0	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	0,0	0,0	1,7	2,7	4,7	60,7	52,0	40,4	36,4	30,3
1050	12	14	18	20	24	1528,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	0,0	0,1	2,1	3,1	5,1	57,8	49,5	38,5	34,7	28,9
1100	12	14	18	20	24	1528,0	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	0,0	0,4	2,4	3,4	5,4	55,2	47,3	36,8	33,1	27,6

1150	12	14	18	20	24	1528,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	0,0	0,7	2,7	3,7	5,7	52,8	45,2	35,2	31,6	26,4
1200	12	14	18	20	24	1528,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	0,0	0,9	2,9	3,9	5,9	50,6	43,3	33,7	30,3	25,3
1250	12	14	18	20	24	1528,0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,2	1,2	3,2	4,2	6,2	48,5	41,6	32,3	29,1	24,3

Продовження табл. Б.3

R, м	d, мм					S, мм	yR					y/2					%yR				
	12	14	18	20	24		5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	0,4	1,4	3,4	4,4	6,4	46,7	40,0	31,1	28,0	23,3
300	12	14	16	18	20	1530,0	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	202,5	173,6	151,9	135,0	121,5
400	12	14	16	18	20	1530,0	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	151,9	130,2	113,9	101,2	91,1
500	12	14	16	18	20	1530,0	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	121,5	104,1	91,1	81,0	72,9
600	12	14	16	18	20	1530,0	12,2	12,1	12,1	12,1	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	101,3	86,8	75,9	67,5	60,7
700	12	14	16	18	20	1530,0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	86,8	74,4	65,1	57,8	52,1
750	12	14	16	18	20	1530,0	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	81,0	69,4	60,7	54,0	48,6
800	12	14	16	18	20	1530,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	75,9	65,1	56,9	50,6	45,5
850	12	14	16	18	20	1530,0	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	0,0	0,0	0,0	0,4	1,4	71,5	61,3	53,6	47,6	42,9
900	12	14	16	18	20	1530,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	0,0	0,0	0,0	0,9	1,9	67,5	57,9	50,6	45,0	40,5
950	12	14	16	18	20	1530,0	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	0,0	0,0	0,3	1,3	2,3	64,0	54,8	48,0	42,6	38,4
1000	12	14	16	18	20	1530,0	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	0,0	0,0	0,7	1,7	2,7	60,8	52,1	45,6	40,5	36,4
1050	12	14	16	18	20	1530,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	0,0	0,1	1,1	2,1	3,1	57,9	49,6	43,4	38,6	34,7
1100	12	14	16	18	20	1530,0	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	0,0	0,4	1,4	2,4	3,4	55,2	47,3	41,4	36,8	33,1
1150	12	14	16	18	20	1530,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	0,0	0,7	1,7	2,7	3,7	52,8	45,3	39,6	35,2	31,7
1200	12	14	16	18	20	1530,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	0,0	0,9	1,9	2,9	3,9	50,6	43,4	38,0	33,7	30,4
1250	12	14	16	18	20	1530,0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,2	1,2	2,2	3,2	4,2	48,6	41,7	36,4	32,4	29,1
1300	12	14	16	18	20	1530,0	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	0,4	1,4	2,4	3,4	4,4	46,7	40,1	35,0	31,1	28,0
300	8	14	16	18	20	1512,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	300,3	171,5	150,1	133,4	120,0
400	8	14	16	18	20	1512,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	225,2	128,6	112,5	100,0	90,0
500	8	14	16	18	20	1512,0	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	180,2	102,9	90,0	80,0	72,0
600	8	14	16	18	20	1512,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	150,1	85,8	75,0	66,7	60,0
700	8	14	16	18	20	1512,0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	128,7	73,5	64,3	57,2	51,4
750	8	14	16	18	20	1512,0	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	120,1	68,6	60,0	53,4	48,0
800	8	14	16	18	20	1512,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	112,6	64,3	56,3	50,0	45,0
850	8	14	16	18	20	1512,0	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	0,0	0,0	0,0	0,5	1,5	106,0	60,5	53,0	47,1	42,4
900	8	14	16	18	20	1512,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	100,1	57,2	50,0	44,5	40,0
950	8	14	16	18	20	1512,0	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	0,0	0,0	0,4	1,4	2,4	94,8	54,2	47,4	42,1	37,9

1000	8	14	16	18	20	1512,0	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	0,0	0,0	0,8	1,8	2,8	90,1	51,5	45,0	40,0	36,0
1050	8	14	16	18	20	1512,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	0,0	0,1	1,1	2,1	3,1	85,8	49,0	42,9	38,1	34,3
1100	8	14	16	18	20	1512,0	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	0,0	0,5	1,5	2,5	3,5	81,9	46,8	40,9	36,4	32,7

Закінчення табл. Б.3

<b>R, м</b>	<b>d, мм</b>					<b>S, мм</b>	<b>yR</b>					<b>y/2</b>					<b>%yR</b>				
1150	8	14	16	18	20	1512,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	0,0	0,7	1,7	2,7	3,7	78,3	44,7	39,1	34,8	31,3
1200	8	14	16	18	20	1512,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	75,1	42,9	37,5	33,3	30,0
1250	8	14	16	18	20	1512,0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,0	1,2	2,2	3,2	4,2	72,1	41,2	36,0	32,0	28,8
1300	8	14	16	18	20	1512,0	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	0,0	1,5	2,5	3,5	4,5	69,3	39,6	34,6	30,8	27,7

Таблиця Б.4

## Характеристики процесу коливань вагону ЦНІІ-ХЗ-0

V	P, кН	P <sub>0</sub> , МПа	w, см <sup>2</sup>	L, см	t, с	Рейка, м	Прокладка, м	Шпала, м	Балласт, м	Земпол, м	Балласт,м	Земпол, м
10	109,7	1275,162	1,290424	1,28180	0,0046145	0,18	0,008	0,2	0,25	2,0643	0,4	1,6963
20	114,4	1293,119	1,3270	1,29985	0,0023397	0,18	0,008	0,2	0,25	0,7145	0,4	0,3465
30	119,2	1310,957	1,3639	1,31778	0,0015813	0,18	0,008	0,2	0,25	0,2645	0,35779209	0
40	124	1328,323	1,4003	1,33524	0,0012017	0,18	0,008	0,2	0,26599	0	0,26599	0
50	128,7	1344,898	1,4354	1,35190	0,0009734	0,18	0,008	0,2	0,2108	0	0,2108	0
60	133,6	1361,754	1,4716	1,36885	0,0008213	0,18	0,008	0,2	0,174	0	0,174	0
70	138,5	1378,203	1,5074	1,38538	0,0007125	0,18	0,008	0,2	0,1477	0	0,1477	0
80	143,6	1394,916	1,5442	1,40218	0,0006310	0,18	0,008	0,2	0,12797	0	0,12797	0
90	148,7	1411,238	1,5805	1,41859	0,0005674	0,18	0,008	0,2	0,1126	0	0,1126	0
100	154	1427,809	1,6179	1,43524	0,0005167	0,18	0,008	0,2	0,1003	0	0,1003	0
110	159,4	1444,306	1,6555	1,45183	0,0004751	0,18	0,008	0,2	0,0903	0	0,0903	0
120	164,8	1460,435	1,6926	1,46804	0,0004404	0,18	0,008	0,2	0,08189	0	0,08189	0

В таблиці наведено: - швидкість руху; - значення динамічної сила; - максимальні нормальні/дотичні напруження на площі контакту;  
- площа контакту рейки з колесом; - довжина контакту вздовж рейки; - час дії на площі контакту; - глибину проходження за час дії сили.

В табл.Б.4 демонструє значення для контакту нових коліс з новими рейками.

## Додаток В. Данні експерименту

Таблиця В.1

## Результати зважування

Ось	Загальна	Ліве колесо	Праве колесо	Тип вагону	Вага осі, т
1	21,06	10,74	10,32	A	21,06
2	20,28	10,26	10,02	A	22,08
3	16,88	8,82	8,06	C	20,48
4	17,18	8,94	8,24	C	19,88
5	17,24	9,14	8,1	F	19,04
6	17,38	8,3	9,08	F	19,18
7	17,28	9,32	7,96	F	19,08
8	17,44	8,4	9,04	F	19,24
9	17,38	9,26	8,12	F	19,18
10	17,38	8,56	8,82	F	19,18
11	17,34	9,54	7,8	F	19,14
12	17,34	8,34	9	F	18,74
13	17,24	9,52	7,72	G	18,24
14	18	8,7	9,3	G	18,9
15	18,56	9,98	8,58	D	20,46
16	18,92	10,18	8,74	E	20,72
17	18,38	9,12	9,26	I	19,58
18	17,54	8,36	9,18	F	19,34
19	17,48	9,6	7,88	F	19,28
20	17,54	8,38	9,16	F	19,34
21	17,54	9,52	8,02	F	19,34
22	17,44	8,48	8,96	F	19,24
23	17,38	9,72	7,66	F	19,18
24	17,42	8,22	9,2	F	19,22
25	17,44	9,46	7,98	F	19,24
26	17,38	8,26	9,12	F	19,18
27	17,36	9,54	7,82	F	19,16
28	17,86	8,56	9,3	F	20,16
29	20,04	9,94	10,1	B	21,44
30	20,66	10,5	10,16	A	20,66

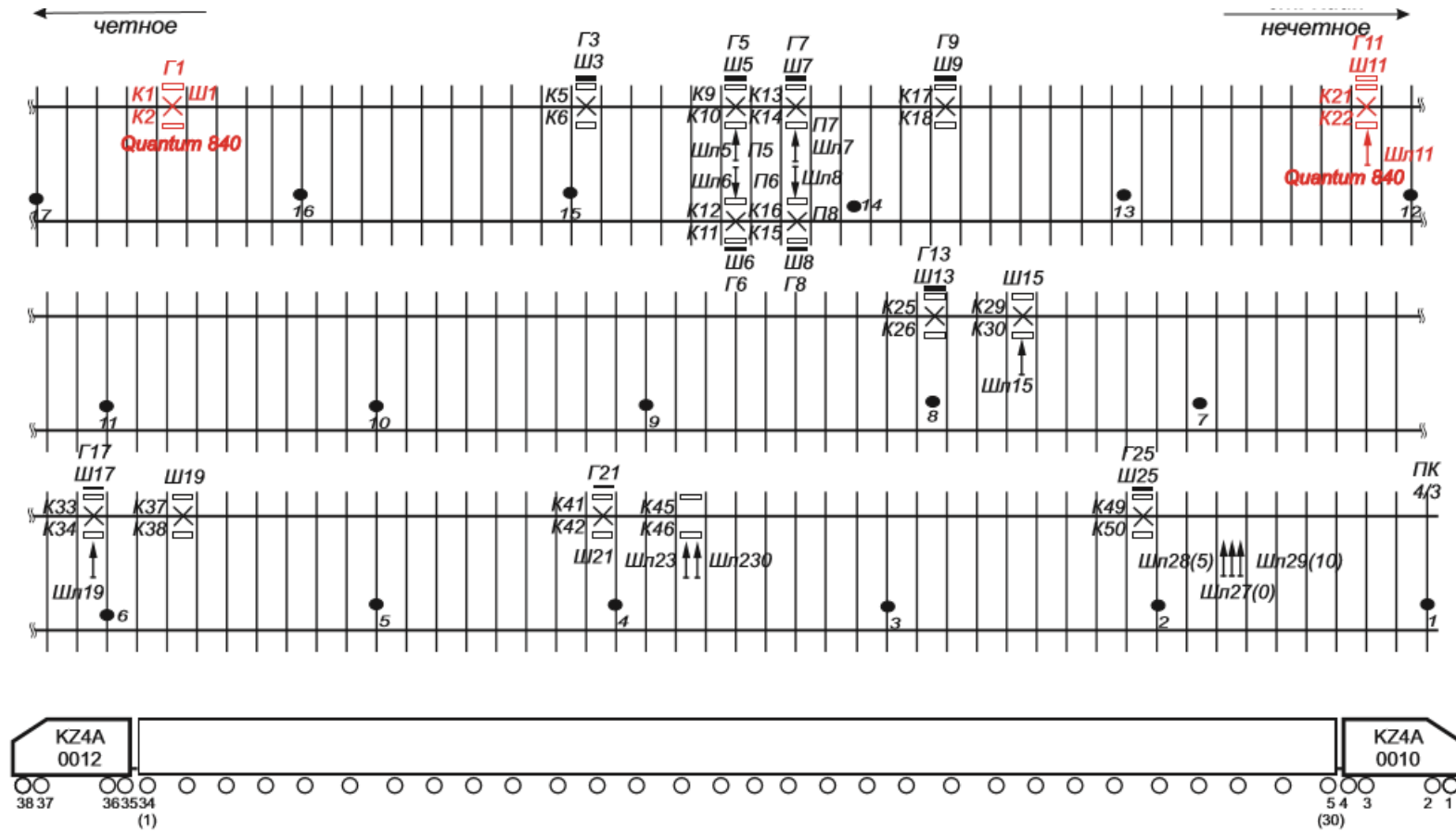


Рисунок В.1 – Схема розташування датчиків на прямій ділянці колії

Таблиця В.2

## Результати статистичних даних за протоколом

Параметр	Допустимі значення	Швидкість, км/год.						
		80	100	120	140	160	180	200
Динамічні напруження розтягу в кромках підшви рейки, МПа	240	82,4	81,1	88,0	99,4	101,6	106,6	98,7
Бокові сили, що передаються від колеса до рейки, кН	100	52,6	53,7	53,5	51,9	52,0	54,5	51,2
Напруження в баласті під шпалою, МПа	0,5	0,102	0,101	0,104	0,105	0,095	0,090	0,090
Напруження на основній площадці земляного полотна, МПа	0,08	0,031	0,030	0,031	0,032	0,029	0,027	0,027
Критерій стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного здвигу по баласту	1,4	0,72	0,71	0,70	0,70	0,72	0,74	0,71
Відношення рамної сили до вертикального статичного навантаження колісної пари на рейки	0,4	0,23	0,23	0,25	0,27	0,28	0,30	0,33
Динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка, кН/м	168	120	111	114	115	115	115	123
Вертикальна сила, що передається від колеса на рейку кН	-	82,1	83,0	81,1	77,5	75,6	73,5	69,6
чисельник - максимально імовірне /знаменник – середнє значення		114,6	113,4	115,9	117,5	106,2	101,1	101,1

Таблиця В.3

## Результати величин вертикальних сил при різних поєднаннях даних

Вісі	кількість	середні	Максимальні імовірні	Максимальні спостережені
без поєднань для Ш5				
1	1	101,9	101,9	101,9
2	1	97,65	97,65	97,65
3	1	96,26	96,26	96,26
4	1	107,2	107,2	107,2
5	1	96,66	96,66	96,66
6	1	100,8	100,8	100,8
7	1	98,05	98,05	98,05
8	1	93,77	93,77	93,77
9	1	96,06	96,06	96,06
10	1	88,21	88,21	88,21
11	1	92,78	92,78	92,78
12	1	88,71	88,71	88,71
13	1	93,18	93,18	93,18
14	1	84,54	84,54	84,54
15	1	109,5	109,5	109,5
16	1	80,76	80,76	80,76
17	1	95,86	95,86	95,86
18	1	83,05	83,05	83,05
19	1	97,75	97,75	97,75
20	1	101,6	101,6	101,6
21	1	89,7	89,7	89,7
22	1	88,31	88,31	88,31
23	1	94,97	94,97	94,97
24	1	86,03	86,03	86,03
25	1	96,85	96,85	96,85
26	1	86,03	86,03	86,03
27	1	93,08	93,08	93,08
28	1	88,01	88,01	88,01
29	1	91,59	91,59	91,59
30	1	85,93	85,93	85,93
Поєднання за осями точка Ш5				
1	16	82,89	96,59	95,46
2	16	91,91	106,5	102
5	120	77,66	96,46	96,36
Поєднання за осями та точками				
1	136	83,39	108	121,4
2	136	85,98	110,8	116,8
5	1020	74,47	101,4	113,9

Таблиця В.4

**Результати величин горизонтальних сил при різних поєднаннях даних**

Вісі	кількість	середні	Максимальні імовірні	Максимальні спостережені	Мінімальні імовірні	Мінімальні спостережені
без поєднань для ГЗ						
1	4	36,45	57,63	47,36	15,27	27,88
2	4	40,2	63,95	49,96	16,44	30,53
3	4	36,74	57,46	45,78	16,02	28,21
4	4	34,48	54,35	42,49	14,6	26,07
5	4	35,94	55,85	44,33	16,03	27,82
6	4	32,13	44,79	37,29	19,46	26,04
7	4	33,08	60,74	45,17	5,42	20,54
8	4	32,76	42,34	37,03	23,19	28,18
9	4	30	51,9	39,22	8,11	21,06
10	4	30,77	57,87	42,04	3,67	19,59
11	4	36,63	59,49	45,83	13,77	27,05
12	4	31,19	58,11	43,05	4,27	19,73
13	4	37,43	54,33	44,32	20,53	30,37
14	4	33,3	53,84	41,89	12,77	25,02
15	4	37,07	55,53	45,73	18,61	29,24
16	4	31,13	46,45	37,37	15,81	23,76
17	4	29,57	50,33	38,31	8,8	20,92
18	4	32,39	63,7	45,57	1,07	19,68
19	4	37,49	65	48,76	9,98	25,07
20	4	33,83	54,22	42,19	13,43	24,89
21	4	29,68	46,59	36,83	12,77	22,63
22	4	32,62	56,22	42,23	9,03	23,13
23	4	37,03	54,69	44,41	19,37	29,94
24	4	28,42	45,1	35,2	11,74	21,17
25	4	33,7	65,26	46,52	2,13	20,73
26	4	32,9	44,59	37,67	21,22	27,17
27	4	34,15	64,72	47,03	3,58	21,7
28	4	35,26	49,79	41,69	20,72	28,38
29	4	30,74	39,33	34,42	22,15	27,08
30	4	35,58	53,9	42,17	17,25	24,38
Поєднання за осями точка ГЗ						
1	16	33,25	50,71	44,47	15,78	24,17
2	16	31,16	45,53	39,18	16,8	21,63
5	12	34,26	52,3	47,36	16,21	24,38
6	4	40,2	63,95	49,96	16,44	30,53
31	8	34,7	58,68	47,03	10,73	21,7
7	76	33,52	55,99	48,76	11,04	19,59
21	8	30,98	57,78	45,57	4,17	19,68
20	4	31,13	46,45	37,37	15,81	23,76
19	4	37,07	55,53	45,73	18,61	29,24
18	4	33,3	53,84	41,89	12,77	25,02
Поєднання за осями та точками						
1	112	33,67	46,81	44,47	20,52	23,14
2	112	32,96	45,74	43,72	20,17	21,63
5	84	34,73	47,82	47,36	21,65	23,39
6	28	38,37	52,54	49,96	24,2	28,1
31	56	35,23	51,32	47,03	19,13	21,14
7	532	34,3	49,12	48,76	19,49	18,28
21	56	32,78	50,04	45,57	15,53	19,28
20	28	34,23	46,95	41,79	21,52	22,68
19	28	37,06	49,05	45,73	25,06	25,2
18	28	33,39	45,93	41,89	20,85	23,1

Таблиця В.5

**Результати величин напружень в кромках при різних поєднаннях даних**

Вісі	кількість	середні	Максимальні імовірні	Максимальні спостережені	Мінімальні імовірні	Мінімальні спостережені
без поєднань для К9						
1	4	49,15	78,01	75,35	61,31	66,9
2	4	58,63	87,61	71,32	33,24	48,47
3	4	45,45	84,05	66,14	23,55	41,28
4	4	55,12	76,79	62,97	26,68	41,76
5	4	69,66	79,73	64,6	27,58	42,62
6	4	60,42	77,13	61,82	25,34	40,12
7	4	53,8	74,2	60,66	28,6	42,14
8	4	51,74	74,7	61,24	25,22	39,74
9	4	53,66	93,17	72,38	21,35	42,43
10	4	51,23	79,34	66,23	31,67	44,15
11	4	51,4	75,47	65,27	33,81	45,98
12	4	49,96	54,89	53,85	49,01	50,97
13	4	57,26	79,03	64,98	27,27	42,71
14	4	55,51	66,76	55,96	30,1	40,12
15	4	54,64	86,26	68,54	22,98	41,76
16	4	51,95	69,32	60,76	38,76	47,8
17	4	53,15	81,76	67,86	21,19	39,84
18	4	48,43	82,54	67,86	32,74	46,07
19	4	54,62	81,05	66,14	29,2	43,96
20	4	54,04	79,23	62,78	23,53	39,16
21	4	51,47	73,84	60,47	25,6	39,36
22	4	57,64	61,12	54,14	37,84	44,83
23	4	55,12	72,33	61,24	34,89	45,88
24	4	51,38	65,93	55,58	28,33	39,36
25	4	49,72	66,13	59,42	42,38	49,05
26	4	49,48	71,16	58,94	27,56	39,64
27	4	53,61	72,97	61,24	30,79	42,91
28	4	47,13	74,95	62,49	32,94	45,31
29	4	54,26	72,36	65,46	46,48	54,14
30	4	49,36	109,3	88,02	29,95	52,7
Поєднання за осями точка К9						
1	16	44,27	64,45	54,62	24,08	27,16
2	16	54,12	84,46	73,82	23,78	34,27
5	12	64,6	86,39	82,17	42,81	55,67
6	4	56,44	70,04	62,39	42,84	50,78
31	8	51,33	64,97	59,9	37,68	45,11
7	76	51,18	67,3	63,93	35,07	39,07
21	8	52,19	65,95	59,51	38,44	42,91
20	4	52,65	62,6	58,65	42,7	48,86
19	4	54,31	78,08	65,27	30,53	44,06
18	4	47,01	58,48	51,93	35,54	42,43
Поєднання за осями та точками						
1	180	44,99	73,64	87,63	16,34	18,63
2	180	46,9	77,8	75,51	16,01	20,71
5	135	54,86	90,31	106,6	19,4	15,83
6	45	50,95	74	75,43	27,9	31,19
31	90	45,35	69,62	77,5	21,08	23,04
7	855	44,89	68,79	80,87	21	17,92
21	90	45,42	72,74	80,68	18,1	24,18
20	45	45,84	68,76	72,27	22,93	24,56
19	45	45,95	69,23	72,46	22,68	29,99
18	45	42,69	62	71,15	23,38	28,61

## Додаток Г. Акти впровадження та використання результатів дисертації



МІНІСТЕРСТВО ЮСТИЦІЇ УКРАЇНИ

ЛЬВІВСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ СУДОВИХ ЕКСПЕРТИЗ

79024, м. Львів, вул. Липинського, 54, тел. 231-70-61, 231-76-13 e-mail: lndise@mail.lviv.ua, ЄДРПОУ 23272864

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Директор ЛНДІСЕ*О.Ф. Курильва*  
О.Ф. Курильва«09» *листопада* 2016 р.**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів науково-дослідної роботи**

Даним актом підтверджується, що у лабораторії залізнично-транспортних досліджень науково-дослідного інституту судових експертиз апробовані та впроваджені при проведенні експертних досліджень результати дисертаційної роботи Бондаренко Ірини Олександрівни «Розробка наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу», в якій розроблено класифікацію станів надійної та функціонально безпечної роботи залізничної колії; сформовано рекомендації з оціночних умов щодо забезпечення безпеки від сходу колеса з рейки при розпиранні рейкової колії за допустимими значеннями ширини колії та допустимими динамічними розширеннями колії; доповнено методика з оціночних умов щодо забезпечення безпеки від сходу колеса з рейки при вкочуванні колеса на головку рейки шляхом врахування динамічних прогинів рейок при розвантаженні коліс.

Використання цих результатів дозволить комплексно враховувати показники надійності залізничної колії при вирішенні питань щодо умов руху поїздів по різних конструкціях залізничної колії та при вирішенні загального завдання судової залізнично-транспортної експертизи в разі сходу з рейок рухомого складу встановлювати безпосередню причину залізнично-транспортної пригоди.

Форма впровадження: результати роботи впровадженні в експертній практиці при вирішенні питань, пов'язаних з розпиранням рейкової колії та вкочування гребня колеса на рейку.

Завідувач лабораторії  
залізнично-транспортних досліджень*О.В. Джус*  
О.В. Джус



ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
«УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»  
ДЕПАРТАМЕНТ КОЛІЙ ТА СПОРУД

вул. Тверська, 5, м. Київ-150, МСП 03680, тел.: (44) 465-03-50, 465-03-80, факс (44) 465-03-59

20.02.2017

№ ЦП - 7/156

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка Лазаряна

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи І.О. Бондаренко  
«Розвиток наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом  
рухомого складу»

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені В.Лазаряна протягом багатьох років проводить науково-дослідні роботи, пов'язані з надійною роботою конструкції залізничної колії, зокрема питань, пов'язаних з дослідженням посилення верхнього шару земляного полотна захисними шарами. Вказані дослідження дозволили розвинути наукові основи оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу з урахуванням стану конструкції залізничної колії.

Безумовно, важливим є проблеми розробки нових підходів визначення раціонального, з точки зору технічного використання колії, співвідношення фактичних умов експлуатації колії, міжремонтних схем та характеристик елементів конструкції колії. Тому, дослідження, проведені в дисертації І.О. Бондаренко, є актуальними.

Результати досліджень було впроваджено при проведенні науково-дослідних робіт: «Дослідження параметрів деформативності колії та розробка критеріїв її оцінки» (ДР №0107U005240); «Проведення досліджень захисного шару земляного полотна та розробка рекомендацій щодо його оптимальної жорсткості» (ДР №0110U006297); «Проведення досліджень фізико-механічних властивостей матеріалів "відпрацьованого" баластного шару, розробка рекомендацій щодо повторного використання цих матеріалів або їх утилізації» (ДР №0111U010324).

000229

Заступник начальника  
Департаменту  
колій та споруд



Г.О. Линник

Затверджую

Перший проректор Дніпропетровського  
національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна

  
Б.С.Боднар

НЗ БОДНАР Б.С. 2016р

19 01 2016

АКТ

про використання результатів дисертації Бондаренко Ірини Олександрівни  
«Розробка наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу»

Дніпропетровськ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі кафедри «Рухомий склад і колія» факультету Львівській філії Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці бакалаврів за напрямком підготовки «Залізничні споруди та колійне господарство» використовуються наукові та практичні результати, одержані в дисертації Бондаренко І.О., а саме: теоретичні результати дисертації використовуються при викладанні дисциплін «Залізнична колія» і «Надійність та технічна діагностика залізничної колії».

Завідувач кафедри

«Рухомий склад і колія»,

к.т.н., доцент



О.М. Баль

Затверджую

Перший проректор Дніпропетровського  
національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Б.С.Боднар

2016р.



АКТ

про використання результатів дисертації Бондаренко Ірини Олександрівни  
«Розробка наукових основ оцінки роботи залізничної колії під впливом рухомого складу»

Дніпропетровськ

«20» серпня 2016

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямком підготовки «Залізничні споруди та колійне господарство» використовуються наукові та практичні результати, одержані в дисертації Бондаренко І.О., а саме:

- 1) теоретичні результати дисертації використовуються при викладанні дисциплін «Надійність та технічна діагностика залізничної колії», «Залізнична колія»;
- 2) результати дисертації використовуються при виконанні дипломних магістерських робіт та дипломних проектів студентами спеціальності «Залізничні споруди та колійне господарство».

Завідувач кафедри

«Колія та колійне господарство»,

к.т.н., доцент

М.А. Арбузов

Додаток Д. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові праці:

- включені до міжнародних наукометричних баз «Scopus»

1. 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). – С. 4–10.

2. 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). – С. 28–36.

- включені до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus»

3. Бондаренко І. О. Стосовно питань моделювання життєвого циклу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №55. – С. 78–89.

4. Бондаренко І. О. Стосовно визначення функціонально-безпечної ширини колії / І. О. Бондаренко. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – №12. – С. 74–80.

5. Настечик М. П. Дослідження напруженого стану в елементах вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 під дією рухомого складу / М. П. Настечик, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №56. – С. 146–156.

6. Bondarenko I. O. Formation of estimated conditions for life cycle of deformation work of the railway track / I. O. Bondarenko. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №57. – С. 107–111.

7. Бондаренко І. О. Особливості дослідження процесу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №58. – С. 87–98.

8. Бондаренко І. О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №59. – С. 75–83.

9. Бондаренко І. О. Особливості деформативної роботи залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – №60. – С. 45–56.

- в іноземних виданнях

10. Бондаренко И. А. К вопросу об оценке влияния воздействий подвижного состава на путь / И. А. Бондаренко. // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2015. – №3. – С. 65–70.

11. Курган Д. Н. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Н. Курган, И. А. Бондаренко. // Problemy Kolejnictwa-Zeczyt. – 2015. – №159. – С. 99–111.

- у фахових виданнях, затверджених МОН України

12. Харлан В. І. Вирішення задач вибору раціональних швидкостей руху поїздів за допомогою математичного моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки / В. І. Харлан, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – №16. – С. 41–44.

13. Бондаренко И. А. К вопросу о повышении качественной оценки работоспособности железнодорожного пути / И. А. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – №18. – С. 47–51.

14. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. //

Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – №19. – С. 78–83.

15. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Транспортні системи і технології. – 2011. – №18. – С. 14–18.

16. Рыбкин В. В. Методика оценки эксплуатационной надежности стрелочных переводов и их элементов / В. В. Рыбкин, Е. М. Баль, И. А. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №35. – С. 124–129.

17. Бондаренко І. О. Рекомендації щодо проектування конструкцій нижньої будови залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №36. – С. 100–104.

18. Бондаренко І. О. Щодо забезпечення якості проектування конструкції земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №37. – С. 120–123.

19. Рыбкин В. В. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів / В. В. Рыбкин, О. М. Баль, І. О. Бондаренко. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №38. – С. 127–133.

20. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В. Е. Савлук. // Будівництво, реконструкція та експлуатація конструкцій і споруд залізничного транспорту. – 2012. – №31. – С. 225–230.

21. Бондаренко І. О. Стосовно питань щодо підвищення стабільності земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Транспортні системи і технології. – 2011. – №21. – С. 22–27.

22. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – №43. – С. 139–148.

23. Бондаренко І. О. Вплив контакту рейки та колеса на деформативну роботу залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – №10. – С. 77–81.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

24. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Тези XII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 28-30.05.2008. - Дніпропетровськ, 2008. - С. 45.

25. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д.М.Курган, І.О.Бондаренко. // Тези 69 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 21-22.05.2009. - Дніпропетровськ, 2009. - С. 160-161.

26. Патласов О. М. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко, В. Є. Савлук. // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.04.2011. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 176-177.

27. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної

колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»,

14-15.04.2011. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 177-178.

28. Рибкін В. В. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. М. Баль, І. О. Бондаренко. // Тези 71 Міжнародної науково-практичної конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.04.2011. – Дніпропетровськ, 2011. - С. 178-179.

29. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 23-25.05.2012. - Дніпропетровськ, 2012. - С. 27-28.

30. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В.Є. Савлук. // Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 23-25.05.2012. - Дніпропетровськ, 2012. - С. 28-29.

31. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології», 11-12.04.2013. – Київ, 2013. - С. 96.

32. Рибкін В. В. Оцінка втомлено-міцнісних характеристик елементів вузла проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 при повторно-змінних циклах навантаження конструкції / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції

«Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», 18-20.09.2013. - Дніпропетровськ, 2013. - С. 39.

33. Курган Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», 18-20.09.2013. - Дніпропетровськ, 2013. – С. 73-74.

34. Бондаренко І. О. До вирішення задач з прогнозування стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль [Текст] / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», 18-20.09.2013. - Дніпропетровськ, 2013. – С. 74-75.

35. Бондаренко І. О. Стосовно питань визначення надійності роботи земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. // Тези 74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 15-16.05.2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 14.

36. Бондаренко І. О. Щодо застосування геоматеріалів в конструкціях земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Тези 74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 15-16.05.2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 22

37. Бондаренко І. О. Особливості, що необхідно враховувати при відновленні стану земляного полотна / І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародного технічного семінару «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії», 25.09. 2015. - Львів, 2014. – С. 7-8.

38. Стеллей М. Перспективи дослідження модульної колійної техніки в Україні / М. Стеллей, Р. Голтгаус, О. М. Баль, М. А. Арбузов, І. О. Бондаренко, В. Є. Савлук. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної

конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 216-218.

39. Бондаренко І. О. Особливості, що необхідно враховувати при відновленні стану земляного полотна / І. О. Бондаренко. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 218-219.

40. Бондаренко І.О. Особливості процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі залізничної колії / І. О. Бондаренко. // Тези 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 219-220.

41. Бондаренко І. О. Надійність і ресурсозбереження залізниць / І. О. Бондаренко. // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості». 10-13.06.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 26-27.

42. Бондаренко І. О. Стосовно оцінки впливу дії рухомого складу на залізничну колію / І. О. Бондаренко. // Тези Міжнародної науково-практичної конференції ім. Сокола Е. М. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», 9-11.09.2015. – Львів, 2015. – С. 57-59.

43. Бондаренко І. О. Аналіз впливу колісної пари на процес деформативної роботи колії / І. О. Бондаренко. // Тези XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», 25-27.05.2016. - Дніпропетровськ, 2016. – С. 26-27.

- які додатково відображають наукові результати дисертації:

44. Бондаренко І. О. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В.Є. Савлук. // Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – №37. – С. 124–128.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основи положення та результати дисертації усно докладалися на:

- XII-ій, XIII-ій, XIV-ій Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми механіки залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 28.05-30.05.2008, 23.05-25.05.2012, 25.05-27.05.2016 рр.;

- 69-ій, 71-ій, 74-ій, 75-ій Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 21.05-22.05.2009, 14.04-15.04.2011, 15.05-16.05.2014, 14.05-15.05.2015 рр.;

- V-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології», м. Київ, 11.04-12.04.2013 р.;

- Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», присвяченій 100-річчю професора М.А. Фрішмана, м. Дніпропетровськ, 18.09-20.09.2013 р.;

- Міжнародному технічному семінарі «Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії», м. Львів, 25.09.2015 р.;

- VI-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», смт. Воловець, Закарпатської обл., Воловецький р-н, 10.06-13.06.2015 р.;

- Міжнародній науково-практичній конференції імені Сокола Е. М. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», м. Львів, вересень, 9.09-11.09.2015 р.

В повному обсязі дисертація докладалася на міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна 27.12.2016 р.