

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КУРГАН ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 625.1.033:[539.3+536.722]

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ
ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ШВИДКІСНИМ РУХОМИМ СКЛАДОМ**

Спеціальність: 05.22.06 – залізнична колія
галузь знань: 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



Науковий консультант Босов Аркадій Аркадійович, доктор технічних наук,
професор

Дніпро – 2017

АНОТАЦІЯ

Курган Д. М. Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія (27 – транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2017.

Дисертація присвячена проблемі створення методології (системи стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом. У роботі проаналізовано технічний стан колійної інфраструктури та наявність наукового забезпечення для впровадження швидкісного руху поїздів. Забезпечення високих значень швидкості руху поїздів повинно ґрунтуватися на наявності відповідних методико-розрахункових та нормативних документів. Більшість існуючих методик базуються на принципах, які доцільні тільки для прискореного руху – до 160 км/год. На підставі проведеного аналізу конструктивних характеристик колії, показників її технічного стану і експлуатаційних факторів сформульовано проблемні завдання, що виникають через відсутність теоретичної моделі, яка враховувала б динамічні процеси, що відбуваються в колійній інфраструктурі при високих швидкостях, що є визначальним фактором в забезпеченні надійного й безпечного функціонування залізничної колії на напрямках швидкісних залізниць.

Розроблено рекомендації щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану залізничної колії з обґрунтуванням меж їх застосування. Збільшення рівня швидкості руху впливає на процеси формування динамічних сил, що діють від колеса на рейку. За комплексним аналізом аналітичних розрахунків і результатів статистичної обробки експериментальних даних встановлено, що за впливовістю різних динамічних факторів можна відокремити такі швидкісні

зони: до 100–120 км/год, 120–250 км/год, більше 250 км/год. Основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів, які рухаються зі швидкістю 120 км/год і більше, є коливання системи «колесо–рейка», а саме – проходження колесом динамічної рейкової нерівності.

Вдосконалено методику аналітичних розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії для врахування нерівнопружності підрейкової основи. Нерівнопружність залізничної колії є одним з факторів ускладнення розрахунків напружено-деформованого стану. Розроблено принципи врахування як локальних змін модуля пружності підрейкової основи (наявність відхилень в утриманні), так і сполучень ділянок конструктивно різної пружності (мости, переїзди) для розрахунків залізничної колії на міцність. Запропоновані аналітичні вирази та корегуючі коефіцієнти дозволяють, на відміну від існуючих методик, врахувати як локальні зміни модуля пружності підрейкової основи, так і сполучення ділянок конструктивно різної жорсткості під час виконання розрахунків залізничної колії на міцність. Отримані результати перерозподілу дії сил при різкій зміні модуля пружності пояснюють первопричину утворення вертикальних нерівностей перед мостом. На подальший розвиток нерівності (більш полого поширення далі від моста), окрім зазначених причин, будуть впливати динамічні ефекти дії від проходження рухомого складу по вже наявній нерівності колії.

При русі колеса по рейці разом з вертикальними виникають і горизонтальні сили, які притискають колесо до рейки. Враховуючи геометричні обриси колеса й рейки, такий процес може привести до зміщення точки їх контакту на реборду колеса і до перекочування колеса через рейку. Традиційно такі процеси розглядалися для вантажних поїздів, але порушення умови може відбуватися не тільки при збільшенні горизонтальної сили, а й при зменшенні вертикальної, що властиво для «легких» пасажирських вагонів. При високому рівні непогашеного

прискорення, що іноді може бути доцільним, значення коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки в окремих випадках наближається до гранично допустимого значення.

Створено математичну модель взаємодії колії та рухомого складу, яка дозволить визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів. Вперше: враховано динамічний обрис простору залізничної колії, що взаємодіє з рухомих складом. За такими принципами розроблено просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, яка дозволяє визначати напружено-деформований стан залізничної колії при взаємодії з рухомих складом з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечує можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів.

У роботі отримано аналітичні залежності та сформульовано основні положення математичного інструменту для створення моделей напружено-деформованого стану залізничної колії за принципом поєднання рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на даний момент часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації. Отримано розв'язки таких задач, супутніх при реалізації математичної моделі: визначення рівнянь обрису поширення фронту взаємодії, опис розширення просторової поверхні області взаємодії через векторну множину, корегування обрису фронту поширення напружень об'єктами обмеженого (шпали, підкладки і т. ін.) та напівобмеженого (баласт, земляне полотно і т. ін.) простору, корегування фронту поширення напружень при переході з одного об'єкта в наступний з іншими фізичними властивостями, визначення рівнянь динамічної рівноваги деформованих зон простору, опис функцій розподілу напружень для відокремленої зони простору, принципи передачі тиску від одного об'єкта до наступного через поверхню контакту тощо.

Адекватність моделі для вирішення поставлених задач підтверджена порівнянням результатів з експериментальними даними та з аналітичними методиками розрахунків при відповідній тотожності розрахункових умов.

Проаналізовано особливості впливу сучасного пасажирського рухомого складу на напружено-деформований стан залізничної колії за результатами комплексу теоретичних і експериментальних досліджень. Розширено: закономірності впливу сучасних пасажирських поїздів на напружено-деформований стан залізничної колії, що ґрунтуються як на теоретичних, так і на експериментальних дослідженнях. Отримані результати розширюють існуючі уявлення щодо законів розподілу динамічного навантаження на колію і дають змогу обґрунтовувати вибір розрахункових сил під час виконання розрахунків для швидкостей руху поїздів 160 км/год і вище.

За результатами експериментальних досліджень для сучасних пасажирських поїздів отримано залежності динамічних значень вертикальної сили від швидкості руху до 200 км/год включно. Для локомотивів спостерігається майже лінійна залежність максимальної вірогідної сили від швидкості руху, що відповідає розрахункам за чинними методиками; для пасажирських вагонів кореляція між значеннями сили і швидкістю руху не виражена. Для низької швидкості (80 км/год) розподіл значень вертикальної сили, виміряних експериментально, майже повністю збігається з теоретичним розподілом за законом Гаусса; для високої швидкості руху (200 км/год) експериментально отриманий закон розподілу має асиметричне відхилення на 10 % у бік зменшення діючої сили.

Визначено технічні параметри конструкції колії та умови її експлуатації, за яких можливо виникнення динамічних процесів взаємодії, що виходять за межі застосування квазістатичних методів розрахунків. Динамічний прогин рейки характеризується не тільки розміром, а й швидкістю поширення, обидві ці характеристики обернено залежать від жорсткості шарів підрейкової основи, деформації яких відбуваються зі швидкістю й обрисом руху просторових хвиль у речовині. Вперше отримано

обґрунтовані значення швидкості руху для різних конструкцій і умов експлуатації колії, за яких не встигає реалізовуватися повний прогин рейки, що встановлює межі адекватного використання квазістатичних методів розрахунків, які раніше не визначалися. Встановлено рівні швидкості руху відповідно до конструкції колії, при яких підрейкова основа не встигає реалізувати деформації по всій довжині формування прогину рейки, що призводить до принципових змін напружено-деформованого стану.

Встановлено узагальнені закономірності та залежності для врахування динамічного прогину підрейкової основи в сучасних моделях взаємодії залізничної колії з рухомим складом. Визначено принципи формування частини простору підрейкової основи, що взаємодіє з рухомим навантаженням, залежно від конструкції колії і швидкості руху поїздів. При високих значеннях швидкості руху динаміка зміни цієї області є одним із визначальних параметрів для моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії. Вперше отримано математичні залежності, які дають змогу аналітично визначити обрис області простору підрейкової основи, що бере участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку. Раніше такі задачі мали розв'язок тільки для квазістатичних розрахункових схем. Вони можуть бути використані для вирішення питань встановлення підсилюючих шарів, захисних споруд, обґрунтування розмірів розрахункового простору під час моделювання залізничної колії методами скінченних елементів тощо.

Отримано теоретично обґрунтовані коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії для розрахунків динаміки рухомого складу в сучасних моделях на основі систем рівнянь, складених за принципом Лагранжа–д'Аламбера. Встановлені значення, на відміну від наведених в інших джерелах, мають обґрунтовану залежність відносно конструкції колії і швидкості руху. Коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії як опори, приведеної до взаємодії з колесом у моделях руху екіпажів, визначаються не тільки пружністю шарів підрейкової основи, а й мають пряму і обернену залежності від швидкості руху відповідно.

Розроблено метод оцінки впливу швидкісного пасажирського руху в сучасних умовах на життєвий цикл експлуатації ділянки. Вперше розроблено аналітичні методи оцінки життєвого циклу ділянок залізничної колії на основі ентропії системи. Використання ентропії дало змогу представити старіння залізничної колії в міжремонтний період як імовірнісний процес накопичення деформацій у результаті реакції на зовнішнє навантаження, виражене через показники механічної роботи. Такий підхід, на відміну від існуючих, дає змогу визначати строки експлуатації залізничної колії не тільки за пропущеним тоннажем, а й враховуючи структуру поїздопотoku, у тому числі вплив швидкісного й високошвидкісного пасажирського руху.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена методологія (система стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом дозволяє вирішувати задачі проектування та утримання ділянок відповідно до нормативів швидкісного й високошвидкісного руху поїздів. Нові підходи, положення й результати досліджень використані під час розробки й видання таких нормативних документів Департаменту колії ПАТ «Укрзалізниця»: «Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії», «Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України», «Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України».

Основні результати дослідження були використані в бюджетній фундаментальній науково-дослідній роботі «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549) та в інших науково-дослідних роботах.

Більшість теоретичних положень, викладених у дисертації, впроваджено в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна під час

викладання дисциплін «Проектування залізничної колії» (ОКР «магістр»), «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах» (ОКР «бакалавр», ОКР «магістр»).

Ключові слова: верхня будова колії, швидкісний рух, високошвидкісний рух, взаємодія колії і рухомого складу, напружено-деформований стан, розрахунки колії на міцність, динамічний прогин, теорія пружності, поширення хвиль, ентропія, пасажирський рух, життєвий цикл.

ABSTRACT

Kurhan D. M. Methodology for calculating the railway track at interaction with fast-speed rolling stock. – The qualification scientific work on the manuscript.

The dissertation in support for a Doctor of Technical Science degree, specialty 05.22.06 – railway track (27 – transport). – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2017.

The work is a completed scientific research in which the actual scientific and technical problem of developing a methodology for determining the stress-strain state of the railway track for the introduction of fast-speed, and in the future, high-speed movement of trains. The technical condition of the railway infrastructure and the availability of scientific support for the introduction of trains fast-speed movement has been analyzed. The problem of introducing the high-speed traffic in Ukraine is extremely complicated. Providing of high-speed trains should be based on the availability of appropriate methodological-accounting and regulatory documents. Most of the existing techniques are based on principles that are only expedient for accelerated traffic - up to 160 km/h. Therefore, a sectoral problem needs to be solved - creation of a methodology (system of methods, means and strategies) for determining the stress-strain state of the railway track for conditions of fast-speed and high-speed movement of trains.

Recommendations for the improvement of existing analytical methods for calculating the stress-strain state of the railway track with the justification of their applicability bounds has been developed. Increasing the speed of movement level affects the processes of forming the dynamic forces acting from the wheel on the rail. By a comprehensive analysis of analytical calculations and the results of statistical processing of experimental data, it has been established that according to the influence of various dynamic factors, one can divide the following high-speed zones: up to 100-120 km/h, 120-250 km/h, more than 250 km/h. The major factor of the dynamic component excitation of vertical force for modern passenger trains moving at speeds of 120 km/h or more is the fluctuation of the "wheel-rail" system, namely the wheel passing of dynamic rail irregularity.

Improved the method of analytical calculations of the stress-strain state for the railway track to take into account the uneven elasticity of the rail support. Differential elastic of the railway track is one of the factors of calculations complication for the stress-strain state. Principles of taking into account both local changes in the elasticity modulus of the rail support (the presence of deviations in the content) and the combinations of sections of a constructively different elasticity (bridges, crossings), which can be used including for practical calculations of the railway track for stiffness were developed. Proposed analytical expressions and correction factors allow, in contrast to existing methods, to take into account both local changes in the modulus of rail support elasticity and connection of sections of a constructively different stiffness when performing practical calculations of the railway track for strength. Obtained results of the force redistribution at a sudden change of elasticity modulus explain the root cause of the vertical irregularity formation in front of the bridge. Dynamic effects of the action from rolling stock movement along the already existing irregularity of the track will influence on the subsequent development of the irregularity (more sloping distribution further from the bridge), except for the above-mentioned reasons. When wheel movement along

the rail, there are vertical forces with horizontal ones that press the wheel to the rail. Having regard to geometric outlines of the wheel and rail, such a process can lead to a displacement of their contact points on the wheel flange and rolling the wheel through the rail. Traditionally, such processes have been considered for freight trains, but violation of the condition may occur not only with the increase of horizontal force, but also with the decrease of vertical one, which is typical for "light" passenger cars. With unbalanced acceleration level the stability factor against rolling of the wheel flange on the rail head in some cases approaches to the maximum permissible.

The mathematical model of the rolling stock-track interaction has been developed, which will allow determining stress-strain state of the railway track with a complete spatial-temporal account of the deflection dynamics of the rail support. It will enable the implementation of calculations, including for conditions of fast-speed and high-speed movement of trains. First the dynamic outline of the space of the railway track that interacts with the rolling stock was taken into account. Mathematical models of rolling stock-track interaction created by such principles, in contrast to the existing ones, make it possible to determine the stress-strain state of the railway track with a complete spatial-temporal account of the deflection dynamics of the rail support, which provides the possibility of performing calculations for conditions of fast-speed and high-speed movement of trains

The peculiarities of the modern passenger rolling stock impact on the stress-strain state of the railway track based on results of a complex of theoretical and experimental studies has been analyzed. In the paper analytical dependences were obtained and key points of the mathematical tool for the creating models of the stress-strain state of the railway track according to the principle of combining the geometry equations of the system space part outline were formulated. This system was involved in the interaction for a given moment of time and equations of the

dynamic equilibrium of its deformation. Solutions to the following problems associated with the implementation of the mathematical model were obtained: definition of equations for outline of interaction front distribution, description of the spatial surface expansion of the area interaction through the vector set, correction for the front outline of the stresses distribution by objects of limited space (sleepers, substrates, etc.) and semi-limited one (ballast, roadbed, etc.), correction of the stresses front distribution when transition from one object to the next with other physical properties, determination of the equations of the dynamic equilibrium for deformed zones of space, description of the stresses distribution functions for the remote zone in space, principles of pressure transfer from one object to the next through the contact surface, etc.

The adequacy of the developed model for solving problems is justified by comparing the obtained results with calculations performed according to the analytical formulas of elasticity theory for testing the certain principles and components of the model algorithms.

Expanded impact regularities of modern passenger trains on the stress-strain state of the railway track, based both on theoretical and experimental research. Expanded impact regularities of modern passenger trains on the stress-strain state of the railway track, based both on theoretical and experimental research. Obtained results broaden the existing concepts concerning distribution law of dynamic load on the track and allow justifying the choice of calculated forces when performing calculations for train speeds of 160 km/h and above

According to the results of experimental research for modern passenger trains dependences of dynamic values of vertical force from speed up to 200 km/h inclusive were obtained. For locomotives, there is almost linear dependence of the maximum probable force on the speed of movement, which corresponds to calculations by current methods; for passenger cars there is no correlation between values of force and speed of movement. For low speeds (80 km/h), vertical force

distributions measured experimentally almost completely coincide with the theoretical distribution by Gauss' law; for the high speeds of movement (200 km/h), the experimentally obtained distribution law has an asymmetric deviations of 10% toward a decrease in the acting force.

The technical parameters of the track structure and the conditions of its operation, at which it is possible the emergence of dynamic interaction processes that go beyond the use of quasi-static methods of calculation has been determine. Mathematical dependencies that allow analytically determining the outline of the area space of the rail support taking part in the interaction at a given timestamp of the calculation were obtained. First justified values of speeds for various structures and operating conditions of the track, at which the full deflection of the rail fails to realize itself, that determines the adequate use boundaries of quasi-static methods of calculations were obtained. The levels of the movement speed were established in accordance with the structure of the track, under which the rail support does not manage to realize strains along the entire extent of the rail deflection formation. It leads to fundamental changes in the stress-strain state.

Formation principles of a space portion of the rail suport, which interacts with the moving load, depending on the structure of the track and the speed of train were determined. At high speeds of movement the dynamics of change in this area is one of the determining parameters for the stress-strain state simulation of the railway track, justifying the dimensions of the calculated space when application of finite element methods, solving the problems of installing the reinforcing layers, protective structures, etc. To make practical calculations, numerical variation results were obtained and mathematical expressions were formed for the analytical determination of the rail support outline. It takes part in interaction, depending on the timestamp, with accuracy sufficient for engineering calculations. mathematical dependencies that allow analytically determining the outline of the area space of the rail support taking part in the interaction at a given timestamp of

the calculation were obtained. They can be used to solve the problems of installing the reinforcement layers, protective structures, justification of the calculated space size when simulation of the railway track by finite element methods, etc.

Theoretically grounded stiffness coefficients and dissipation of the railway track as a component for calculating the dynamics of rolling stock in up-to-date models based on systems of equations and compounded on the Lagrange-d'Alamber principle were obtained. The set values, in contrast to those given in other sources, have a substantiated dependence in relation to the structure of the track and speeds of movement.

Analytical methods for assessing the life cycle of railway track sections based on entropy of system were developed. The use of entropy made it possible to represent the aging of the railway track during the time between maintenance as probabilistic process of strain accumulation in reaction to the external load, expressed through the indices of mechanical work. This approach, unlike the existing ones, allows defining the terms of operation of the railway track not only by missed tonnage, but also taking into account the structure of train traffic, including the impact of fast-speed and high-speed passenger traffic.

New methods, provisions and results of scientific researches were used by PJSC "Ukrzaliznytsia" when developing the measures for the introduction of fast-speed passenger trains and have been included in the regulatory documents of the Department of Railways and Constructions of PJSC "Ukrzaliznytsia" and LLC "Georgian Railway". They also found practical application in conducting the certification tests of high-speed rolling stock on the railways of Ukraine and Kazakhstan. Methodology and results of the research presented in the thesis became the basis for lecture course and practical sessions at the Department "Track and Track Facilities", DNURT, in disciplines "Designing of railway tracks" and "Mathematical methods and models in special problems".

Keywords: permanent way, fast-speed railway, high-speed railway, rolling stock-track interaction, stress-strain state, track calculations for strength, dynamic deflection, elasticity theory, distribution of waves, entropy, passenger traffic, life cycle.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення і результати дисертації опубліковані

у виданнях, які індексовані в Index Copernicus і є фаховими:

1. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99.
2. Kurhan D. M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 2(56). – P. 136–145.
3. Курган Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 3 (57). – С. 118–128.
4. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 4 (58). – С. 99–109.
5. Курган М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96.
6. Kurhan D. Modeling Of Development Vertical Deformation Of Railway Track / D. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – № 1(61). – С. 100–108.

7. Курган Д. М. Оцінка безпеки руху за умови забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки / Д. М. Курган, В. О. Губар // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 65–72.

8. Курган Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі розповсюдження напружень в залізничній колії / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2016. – № 5(65). – С. 101–113.

9. Kurhan M. Forecasting of Passenger Traffic upon Implementation of High-Speed Running / M. Kurhan, D. Kurhan // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2017. – № 1(67). – P. 117–130.

у закордонних виданнях:

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

11. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83–96.

у монографії:

12. Курган М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган // –Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2016. – 283 с.

у фахових виданнях:

13. Рационалізація перебудови кривих в плані при підвищенні швидкостей руху поїздів / В. В.Рибкін, М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 120–126.

14. Аналіз можливості застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів при організації швидкісного руху / А. П. Зубко, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 4. – С. 156–164.

15. Курган М. Б. Визначення допустимої швидкості руху поїздів з примусовим нахилом кузовів вагонів у кривих ділянках колії / М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 47–52.

16. 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 // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 41–44.

17. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоку на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 19. – С. 78–83.

18. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 20. – С. 233–239.

19. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 88–93.

20. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісн.

Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 124–128.

21. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Зб. наук. пр. ДЕТУТ «Транспортні системи і технології». – Київ, 2011. – Вип. 18. – С. 14–18.

22. Оцінка економічної ефективності усунення обмежень швидкості руху поїздів, пов'язаних із станом залізничної колії / А. А. Босов, М. Б. Курган, Д. М. Курган, С. Ю. Байдак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 106–115.

23. Бабенко А. І. Встановлення допустимої швидкості на складних ділянках плану залізниці з урахуванням комфортабельності їзди / А. І. Бабенко, Д. М. Курган, М. М. Черняков // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технічн. ун-ту трансп. «Транспортні системи і технології». – Київ, 2012. – Вип. 21. – С. 9–15.

24. 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 // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 1 (43). – С. 139–148.

25. 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 // Зб. наук. пр. – Донецьк : ДонІЗТ, 2012. – Вип. № 31. – С. 225–230.

26. Методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів на складних ділянках плану залізниці / М. Б. Курган, Д. М. Курган, Н. П. Хмилевська, С. Ю. Байдак // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – N 2 (50). – С. 83–94.

27. Курган Д. М. Діагностування і виправка положення залізничної колії колійними машинами / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // Українська залізниця. – 2016. – № 8(38). – С. 60–64.

Додаткові праці,

що є нормативними документами Укрзалізниці:

28. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. ЦП-0236 / М. Курган, А. Орловський, О. Патласов, В. Циганенко, Д. Курган. – Київ, 2011. – 52 с.

29. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України. ЦП-0266 / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. І. Белоусов, М. І. Карпов, Д. М. Курган, В. П. Шраменко, А. І. Бабенко, В. А. Штойко, І. О. Олійник, В. А. Лисак, К. Л. Каленик. – Київ, 2012. – 147 с.

30. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, О. М. Патласов, М. І. Карпов, В. П. Шраменко, О. І. Белорусов, В. О. Яковлев, В. М. Молчанов, К. В. Корноухова, М. Б. Курган, Д. М. Курган, В. М. Твердомед, Р. М. Йосифович, О. О. Сорока. – Київ, 2012. – 456 с.

у виданнях, що не є фаховими:

31. Курган Д. М. Адаптація енергетичного методу оцінки безпеки утримання безстикової колії за показником стискаючої сили для інженерних розрахунків / Д. М. Курган, Н. М. Лапшева // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – №. 6. – С. 41–46.

тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:

32. Корженевич И. П. Определение плавности и комфортабельности езды в кривых на участках скоростного движения / И. П. Корженевич,

Н. Б. Курган, Д. Н. Курган // Материалы науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 431–439.

33. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // 69-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2009. – С. 160–161.

34. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // 70-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 180–181.

35. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 176–177.

36. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 177–178.

37. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // XIII Международная конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта». – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2012. – С. 27–28.

38. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології.

Матеріали VI Міжнародної науково-практ. конф. – Київ : ДЕТУТ, 2013. – С. 96.

39. Курган, Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Проблеми взаємодії колії та рухомого складу. Праці міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 73–74.

40. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність з урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. 74-та Міжнародна науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 256–257.

41. Курган Д. М. Особливості сприйняття залізничною колією динамічного навантаження при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 221–222.

42. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 222–223.

43. Курган М. Б. Розвиток нерівностей залізничної колії в зонах нерівнопружності на прикладі переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // 78-ма Міжнародна конф. «Транспортне будівництво та залізнична колія». – Харків, 2016. – С. 93–94.

44. Kurhan D. M. Perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // XIV міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2016. – С. 74–75.

45. Курган Д. М. Моделювання життєвого циклу системи на основі ентропії системи / Д. М. Курган // 6-та науково-практ. міжнародна конф.

«Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – С. 100–101.

ЗМІСТ

ВСТУП	27
1. НАУКОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ СТАНОВЛЕННЯ В УКРАЇНІ ШВИДКІСНОГО РУХУ	39
1.1 Наявність умов для впровадження швидкісного й високошвидкісного руху в сучасній Україні.....	39
1.2 Наукові дослідження вітчизняних вчених в галузі впровадження швидкісного та високошвидкісного транспорту	41
1.3 Колійна інфраструктура для швидкісного руху: безстикова колія з їздою на баласті та безбаластні конструкції залізничної колії.....	43
1.4 Огляд стану питань з математичного моделювання взаємодії рейкової колії і рухомого складу	50
1.5 Передумови застосування просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності	63
1.6 Існуючі підходи застосування теорії пружності для вирішення задач взаємодії	67
1.7 Висновки до розділу 1	70
2. АНАЛІЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧИХ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	72
2.1 Гіпотези та методи сучасних розрахунків колії на міцність	72
2.2 Оцінка впливу факторів, що визначають сили взаємодії колеса і рейки	82
2.3 Визначення навантаження для розрахунків напружено- деформованого стану залізничної колії	90
2.3.1 Імовірнісний підхід з використанням статистичної сукупності динамічних додатків	90
2.3.2 Визначення динамічної сили через статичне навантаження	91
2.3.3 Врахування дії суміжних коліс	93

2.4 Удосконалення розрахунків колії на міцність для нерівнопружної підрейкової основи.....	96
2.4.1 Загальні положення.....	96
2.4.2 Врахування локальної нерівнопружності.....	99
2.4.3 Сполучення колії на баласті з колією на безбаластній мостовій споруді.....	104
2.4.4 Аналіз впливу зміни жорсткості колії в межах переїзду	107
2.5 Вплив взаємодії колії і рухомого складу в горизонтальній площині на обмеження швидкостей руху	109
2.6 Висновки до розділу 2.....	119
3. ПРОСТОРОВА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ.....	121
3.1 Формування рівнянь геометрії простору, залученого до взаємодії	121
3.2 Корегування геометрії поширення простору взаємодії обрисами об'єктів	125
3.2.1 Обмеження простору взаємодії обрисом об'єкту	125
3.2.2 Вхідження поля векторів в наступний об'єкт	128
3.2.3. Геометрія поширення фронту взаємодії для обмеженого простору	130
3.2.4. Геометрія переходу фронту поширення з одного об'єкта в наступний.....	131
3.3 Формування рівнянь динамічної рівноваги напруженого стану об'єктів	134
3.3.1 Загальні положення.....	134
3.3.2 Розрахунок напружень в тілі вільного обрису	135
3.3.3 Перерозподіл напружень при контакті суміжних об'єктів.....	145
3.3.4 Поздовжні коливання вигину балки.....	146
3.4 Моделювання напружено-деформованого стану ділянки залізничної колії як системи об'єктів	149
3.4.1 Загальна розрахункова схема і система рівнянь	149

3.4.2 Моделювання руху зовнішнього навантаження	152
3.5 Аналіз числових розрахунків	153
3.5.1 Розрахунки напружено-деформованого стану окремих об'єктів та їх поєднань.....	153
3.5.2 Розрахунки напружено-деформованого стану ділянки залізничної колії	159
3.6 Висновки до розділу 3	165
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	167
4.1 Визначення характеристик жорсткості залізничної колії за результатами вимірів напружень в рейках	167
4.2 Експериментальне визначення сил дії від колеса на рейку для сучасних пасажирських поїздів	176
4.3 Експериментальна оцінка впливу факторів, що визначають сили взаємодії колеса і рейки.....	182
4.4 Експериментальна оцінка напружень в підрейковій основі від сучасних пасажирських поїздів	188
4.5 Висновки до розділу 4	194
5. РОЗРАХУНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	197
5.1 Використання розробленої моделі для визначення напружень в підрейковій основі.....	197
5.1.1 Визначення напружень в підрейковій основі для точок з різними просторовими координатами	197
5.1.2 Порівняння результатів моделювання напруженого стану підрейкової основи з експериментальними даними	199
5.2 Особливості сприйняття навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху	200
5.2.1 Умови реалізації повного прогину рейки	200

5.2.2 Аналітичне визначення обрису фронту взаємодії в підрейковій основі	206
5.3 Визначення характеристик динамічних прогинів рейки	209
5.4 Введення залізничної колії в моделі руху екіпажів	212
5.5 Аналіз напружено-деформованого стану безбаластної конструкції залізничної колії	221
5.6 Висновки до розділу 5	225
6. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	227
6.1 Моделювання процесу розвитку локальної вертикальної нерівності колії	227
6.2 Теоретичні основи моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи	235
6.3 Методика моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи	241
6.4 Варіантні порівняння за умовами експлуатації	247
6.4.1 Застосування аналітичної методики	247
6.4.2 Застосування розробленої моделі динамічних деформацій залізничної колії	251
6.4.3 Економічна ефективність своєчасного проведення реконструкції, технічного переоснащення колії	256
6.5 Висновки до розділу 6	258
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	260
БІБЛІОГРАФІЯ	265
ДОДАТОК А. ВВЕДЕННЯ В МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИЧНОГО ОБРИСУ ОБ'ЄКТУ	294
ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГИНУ РЕЙКИ	298

ДОДАТОК В. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКОГО ПОЇЗДА «TALGO».....	315
ДОДАТОК Д. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА НАПРУЖЕНЬ В ПІДРЕЙ-КОВІЙ ОСНОВІ ВІД СУЧАСНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ	326
ДОДАТОК Е. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В ПІДШПАЛЬНІЙ ОСНОВІ.....	343
ДОДАТОК Ж. РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ В ПРОГРАМНОМУ ПРОДУКТІ.....	350
ДОДАТОК К. СВІДОЦТВА ПРО АВТОРСЬКІ ПРАВА ТА АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ	361
ДОДАТОК Л. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	370

ВСТУП

Актуальність теми. Інтеграція України до Європейського Союзу поміж інших заходів передбачає інтенсивний розвиток сфери транспортних послуг, які б відповідали сучасним європейським вимогам. Одним з пріоритетних напрямків розвитку залізничного транспорту України є підвищення швидкості руху пасажирських поїздів та подальше впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі й високошвидкісного руху як у межах України, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Проблема впровадження в Україні швидкісного й високошвидкісного руху надзвичайно складна – відсутній рухомий склад, полігон для дослідницьких випробувань, а забезпечення високих швидкостей руху поїздів повинно ґрунтуватися на відповідній вітчизняній нормативній базі, яка тільки починає створюватись. Більшість існуючих методик базується на підходах, доцільних тільки для прискореного руху (до 160 км/год). Тому потребує вирішення галузева проблема – створення методології (системи методів, засобів і стратегій) визначення напружено-деформованого стану залізничної колії для умов швидкісного (161–200 км/год на існуючій трасі) і високошвидкісного (201–250 км/год на існуючій та більше 250 км/год на новій трасі) руху поїздів.

Верхня будова залізничної колії, різні споруди на ній і біля неї становлять комплексну систему елементів, що працюють спільно. Зміна стану одного елемента системи тягне за собою зміну стану й умов роботи всієї верхньої будови колії та прилеглого земляного полотна. Тому одним з основних напрямків дослідження є вивчення взаємного впливу елементів системи при динамічному навантаженні та встановлення впливу швидкісного рухомого складу на систему в цілому.

Використання існуючих аналітичних методів для вирішення подібних завдань у загальній постановці практично неможливе через складність елементів системи – верхньої і нижньої будови колії. Для вивчення дії

рухомих навантажень на пружні середовища, що особливо актуально для руху швидкісних і високошвидкісних поїздів, необхідна сучасна методологія наукових досліджень. При цьому проблема взаємодії колії та рухомого складу фізично є тривимірною задачею, яка повинна розв'язуватися тільки в просторовій постановці. Саме вирішенню цих проблемних завдань присвячена наукова робота.

Зв'язок роботи дисертанта з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174р.; Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони; Програми оновлення рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» на період до 2021 року.

Тема дисертації відповідає галузевій програмі модернізації колійного господарства залізниць України й узгодженій Програмі робіт ОСЗ щодо організації швидкісного руху поїздів на міжнародних транспортних коридорах.

Обраний напрямок досліджень пов'язаний також з виконанням низки науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна згідно з планом НДДКР ПАТ «Укрзалізниця». Основні НДР, у яких здобувач був керівником або відповідальним виконавцем:

- «Проведення досліджень та розробка нормативів щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 та перспективними конструкціями проміжних скріплень» (№ ДР 0108U003893);
- «Проведення обстежень та розробка рекомендацій по ліквідації бар'єрних місць на напрямку Лозова – Гребінка» (№ ДР 0111U007617);

- «Проведення досліджень та оцінка економічної ефективності усунення обмеження швидкості за параметрами і станом залізничної колії» (№ ДР 0111U008909);
- «Перегляд Технічних вказівок по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України (ЦП-0081)» (№ ДР 0111U008912);
- «Розробка інструкції з улаштування та утримання колії ТОВ «Грузинська залізниця» (№ ДР 0112U003109);
- «Розробка рекомендацій з встановлення швидкостей руху поїздів в кривих на напрямках пасажирського, суміщеного й вантажного руху» (№ ДР 0113U002080).

Здобувач брав участь в обробці та аналізі експериментальних даних при проведенні приймальних та сертифікаційних випробувань електропоїзда EJ675 («ŠKODA VAGONKA a.s.»), пасажирського поїзда Talgo (ТОО «Тулпар-Тальго»), пасажирського дизель-поїзда ДПКр-1К (ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод»).

Основні результати дослідження були отримані під час виконання бюджетної фундаментальної науково-дослідної роботи «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549).

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є розробка методології (системи стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом, що забезпечує вирішення важливої науково-технічної проблеми – впровадження швидкісного, а в перспективі й високошвидкісного руху поїздів як в Україні, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Виконати аналіз технічного стану колійної інфраструктури та наявності наукового забезпечення для впровадження швидкісного руху поїздів.
2. Розробити рекомендації щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану залізничної колії з обґрунтуванням меж їх застосування.
3. Розробити математичну модель взаємодії колії та рухомого складу, яка дозволить визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів.
4. Проаналізувати особливості впливу сучасного пасажирського рухомого складу на напружено-деформований стан залізничної колії за результатами комплексу теоретичних і експериментальних досліджень.
5. Визначити технічні параметри конструкції колії та умови її експлуатації, за яких можливе виникнення динамічних процесів взаємодії, що виходять за межі застосування квазістатичних методів розрахунків.
6. Встановити узагальнені закономірності та залежності для врахування динамічного прогину підрейкової основи в сучасних моделях взаємодії залізничної колії з рухомим складом.
7. Розробити метод оцінки впливу швидкісного пасажирського руху в сучасних умовах на життєвий цикл експлуатації ділянки.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії залізничної колії з швидкісним рухомим складом.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан залізничної колії.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених задач у роботі використано: методи та положення динамічної задачі теорії пружності – для розробки математичної моделі залізничної колії з властивостями, які відповідають поставленим задачам; принципи моделювання на основі механіки твердого тіла – для вирішення задач введення залізничної колії в моделі рухомого складу; теорія поширення хвиль – для врахування просторово-часових характеристик обрису підрейкової основи, що бере участь у взаємодії, як однієї з властивостей моделі залізничної колії; диференціальне числення – для створення й реалізації математичного апарату моделі; теорія надійності – для моделювання життєвого циклу експлуатації ділянки; закони та положення термодинаміки – для визначення зв'язку між механічною роботою та життєвим циклом експлуатації через ентропію системи; експериментальні вимірювання тензометричними датчиками – для натурного визначення напружено-деформованого стану залізничної колії під дією поїздів; методи та положення теорії ймовірностей і математичної статистики – для обробки, аналізу й узагальнення результатів експериментальних досліджень; методи об'єктно орієнтованого програмування – для практичної реалізації математичної моделі залізничної колії. Теоретичні розрахунки, експериментальні вимірювання і статистична обробка даних виконані з використанням прикладного програмного забезпечення, у тому числі й спеціального призначення, розробленого як за участю автора (виконання й обробка експериментальних вимірювань), так і особисто автором (реалізація математичної моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, висновки й рекомендації, які отримані в дисертації, обґрунтовані та достовірні, оскільки експериментальні дослідження коректно поставлені та кваліфіковано виконані за участю Колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії ДНУЗТ, яка має акредитацію на технічну компетентність і незалежність у Національному агентстві з акредитації України (атестат № 2Н1100), дослідні результати одержано на основі достатньо великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень.

Основні наукові положення:

1. Динамічний прогин рейки характеризується не тільки розміром, а й швидкістю поширення, обидві ці характеристики обернено залежать від жорсткості шарів підрейкової основи, деформації яких відбуваються зі швидкістю й обрисом руху просторових хвиль у речовині.

2. Для сучасних пасажирських поїздів (таких як Інтерсіті й Інтерсіті+) інтенсивність зміни вертикальної сили дії колеса на рейку не має вираженої залежності від швидкості руху, при цьому основним фактором збільшення цієї сили відносно статичного навантаження є динамічні нерівності колії.

3. Коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії як опори, приведеної до взаємодії з колесом у моделях руху екіпажів, визначаються не тільки пружністю шарів підрейкової основи, а й мають пряму і обернену залежності від швидкості руху відповідно.

4. Життєвий цикл роботи залізничної колії як системи підпорядковується закону ентропії, а поява й накопичення залишкових

деформацій – імовірнісний процес, який визначається флуктуаціями напружень і швидкістю пружних деформацій.

Наукова новизна отриманих результатів

До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, і які виносяться на захист, відносяться наступні положення:

Вперше:

1) враховано динамічний обрис простору залізничної колії, що взаємодіє з рухомим складом. За такими принципами розроблено просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, яка дозволяє визначати напружено-деформований стан залізничної колії при взаємодії з рухомим складом з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечує можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів;

2) отримано обґрунтовані значення швидкості руху для різних конструкцій і умов експлуатації колії, за яких не встигає реалізовуватися повний прогин рейки, що встановлює межі адекватного використання квазістатичних методів розрахунків, які раніше не визначалися;

3) отримано математичні залежності, які дають змогу аналітично визначити обрис області простору підрейкової основи, що бере участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку. Раніше такі задачі мали розв’язок тільки для квазістатичних розрахункових схем. Вони можуть бути використані для вирішення питань встановлення підсилюючих шарів, захисних споруд, обґрунтування розмірів розрахункового простору під час моделювання залізничної колії методами скінченних елементів тощо;

4) розроблено аналітичні методи оцінки життєвого циклу ділянок залізничної колії на основі ентропії системи. Використання ентропії дало змогу представити старіння залізничної колії в міжремонтний період як імовірнісний процес накопичення деформацій у результаті реакції на

зовнішнє навантаження, виражене через показники механічної роботи. Такий підхід, на відміну від існуючих, дає змогу визначати строки експлуатації залізничної колії не тільки за пропущеним тоннажем, а й враховуючи структуру поїздопотоків, у тому числі вплив швидкісного й високошвидкісного пасажирського руху.

Вдосконалено:

5) методику аналітичних розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії для врахування нерівнопружності підрейкової основи. Запропоновані аналітичні вирази та корегуючі коефіцієнти дозволяють, на відміну від існуючих методик, врахувати як локальні зміни модуля пружності підрейкової основи, так і сполучення ділянок конструктивно різної жорсткості під час виконання розрахунків залізничної колії на міцність;

Розширено:

6) закономірності впливу сучасних пасажирських поїздів на напружено-деформований стан залізничної колії, що ґрунтуються як на теоретичних, так і на експериментальних дослідженнях. Отримані результати розширюють існуючі уявлення щодо законів розподілу динамічного навантаження на колію і дають змогу обґрунтовувати вибір розрахункових сил під час виконання розрахунків для швидкостей руху поїздів 160 км/год і вище;

7) отримані теоретично обґрунтовані коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії для розрахунків динаміки рухомого складу в сучасних моделях на основі систем рівнянь, складених за принципом Лагранжа–д’Аламбера. Встановлені значення, на відміну від наведених в інших джерелах, мають обґрунтовану залежність відносно конструкції колії і швидкості руху.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблена методологія (система стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом

дозволяє вирішувати задачі проектування та утримання ділянок відповідно до нормативів швидкісного й високошвидкісного руху поїздів. Нові підходи, положення й результати досліджень використані під час розробки й видання таких нормативних документів Департаменту колії ПАТ «Укрзалізниця»:

- Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії (ЦП-0236);
- Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України (ЦП-0266);
- Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України (ЦП-0269).

Основні результати дослідження були використані в бюджетній фундаментальній науково-дослідній роботі «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549) та в інших науково-дослідних роботах.

Більшість теоретичних положень, викладених у дисертації, впроваджено в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна під час викладання дисциплін «Проектування залізничної колії» (ОКР «магістр»), «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах» (ОКР «бакалавр», ОКР «магістр»).

Особистий внесок здобувача

Усі наукові положення, розробки й результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: [123, 224] – методика врахування нерівнопружності підрейкової основи; [148] – аналіз можливості порушення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки для пасажирського рухомого складу; [135] – аналіз методик прогнозування пасажиропотоку на напрямках будівництва ВШМ; [68, 69,

216, 217] – створення математичної моделі на основі теорії поширення пружних хвиль; [108] – теоретичні основи моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії при високошвидкісному русі поїздів; [18, 130-132, 147, 209, 215] – визначення критеріїв оцінки взаємодії колії і рухомого складу в кривих; [133] – розробка математичної моделі процесу експлуатації залізничної ділянки; [134] – створення методики й виконання розрахунків щодо визначення життєвого циклу колії за показником механічної роботи; [136] – частина методики визначення витрат енергоресурсів за механічною роботою локомотива, яка стосується силової взаємодії у вертикальній площині колії; [137, 213] – реалізація методики розв’язання оптимізаційних задач з використанням теорії графів; [138, 140, 214] – створення методики й виконання розрахунків щодо визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами натурних вимірювань напружень у рейках; [139] – реалізація методики розв’язання оптимізаційних задач з використанням теорії множин; [141, 142, 150] – доповнення до методики визначення допустимих швидкостей руху в кривих для врахування складних випадків; [114, 215] – порівняльний аналіз існуючих методів визначення напружено-деформованого стану залізничної колії із запропонованою моделлю на основі теорії поширення пружних хвиль; [151, 212] – визначення температурного режиму утримання залізничної колії з рейками типу UIC60; [107] – теоретичне обґрунтування врахування в розрахунках стійкості безстикової колії параметрів плану без використання апроксимації.

Роботи [74, 82, 110, 111, 124, 126, 144, 146, 220, 222, 223, 225] написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались і отримали схвалення на таких заходах:

69-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2009); 70-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2011); 71-ша Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2012); VI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, 2013); 74-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2014); 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2015); 78-ма Міжнародна конференція «Транспортне будівництво та залізнична колія» (Харків, 2016); XIV Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту» (Дніпро, 2016); 6-та науково-практична міжнародна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2017).

Дисертація в повному обсязі доповідалася на науковому семінарі кафедри колії та колійного господарства, міжкафедральному науковому семінарі кафедр колії та колійного господарства, проектування і будівництва доріг, мостів і тунелів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпро, 2017).

Публікації

Основний зміст дисертації опублікований у 45 наукових працях і матеріалах конференцій: 27 основних праць, з них: 9 – статті, що

індексуються в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus і є фаховими, 2 – статті в закордонних виданнях, 1 – монографія у співавторстві, 15 – статті у фахових виданнях; і 18 додаткових, з них: 3 – нормативні документи Департаменту колії ПАТ «Укрзалізниця», 14 – тези доповідей та матеріали конференцій.

Структура й обсяг роботи

Дисертація складається із анотації українською і англійською мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг становить 378 с., з них 122 рис. за текстом (3 з них розташовано на 2 окремих сторінках), 17 табл. за текстом (1 розташована на окремій сторінці), список використаних джерел із 242 найменувань подано на 29 с., 8 додатків на 85 с.

РОЗДІЛ 1

НАУКОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ СТАНОВЛЕННЯ В УКРАЇНІ ШВИДКІСНОГО РУХУ

1.1 Наявність умов для впровадження швидкісного й високошвидкісного руху в сучасній Україні

Швидкісні залізниці – це залізниці зі швидкістю від 160 до 200 км/год. [1]. Як правило, це існуючі модернізовані залізниці з переважно пасажирським рухом поїздів; денні експresi з місцями для сидіння і тривалістю поїздки до 5-6 год, мінімальна кількість нічних поїздів.

По всій Європі максимальна швидкість вантажного рухомого складу становить 120 км/год. Якщо пропускна спроможність обмежена і вантажні поїзди рухаються з меншою швидкістю, то недоцільно підвищувати швидкості руху пасажирських поїздів.

Високошвидкісні залізниці (також називаються Lignes Grande Vitesse або швидкісні лінії LGV) визначаються Міжнародним Союзом Залізниць (МСЗ) і ЄС як стандартні, з дозволеною максимальною швидкістю понад 200 км/год, або як нові лінії, з передбаченою максимальною швидкістю понад 250 км/год. Всі високошвидкісні залізничні лінії LGV Великобританії, Франції, Німеччини, Бельгії, Нідерландів, Іспанії та Італії, прокладені протягом останніх 30 років, забезпечують реалізацію проектної швидкості 300 км/год і більше [9].

Відповідно до директиви ЄС 96/48 країни – члени Європейського Союзу погодилися гармонізувати технічні засоби своїх швидкісних залізничних ліній, щоб забезпечити їх експлуатаційну сумісність в міжнародних сполученнях. У розроблених відповідними інстанціями ЄС Технічних специфікаціях інтероперабельності (Technical Specifications for Interoperability, TSI), визначені основні вимоги до інфраструктури і рухомого складу [2]. Країни – члени ЄС повинні ввести вимоги TSI в національне

законодавство, щоб високошвидкісні лінії, які проектується і будуються відповідали цим вимогам.

Відповідно до Додатка I Директиви 2008/57/ЄС високошвидкісні залізничні лінії класифіковані таким чином:

I категорії - спеціально побудовані високошвидкісні лінії, обладнані для руху із швидкістю 250 км/год і більше;

II категорії - спеціально модернізовані високошвидкісні лінії, обладнані для руху із швидкістю близько 200 км/год;

III категорії - спеціально модернізовані високошвидкісні лінії або лінії спеціально побудовані для високої швидкості, які мають особливі характеристики, за наявності топографічних, екологічних, рельєфних або містобудівних обмежень, на яких швидкість має бути адаптована індивідуально [3].

В Україні аналогічного TSI документу немає, оскільки проблеми інтероперабельності залізничного транспорту на пострадянському просторі через історичні причини розвитку не існувало.

Проте, існує міждержавний документ, який регламентує питання будівництва мережі швидкісних і високошвидкісних залізничних ліній, – Рекомендації ОСЗ [4, 5]. В основу класифікації покладені дані по «Параметрах об'єктів інфраструктури на найбільш важливих з міжнародної точки зору залізничних лініях» (документ МСЖД ECE/TRANS/63 стор. 85 Додаток II), табл. 1.1.

**Таблиця 1.1 – Класифікація електрифікованих магістралей ліній і ділянок
залізниць швидкісного і високошвидкісного руху.**

Умови створення швидкісної лінії	Існуючі лінії, А		Нові лінії, В	
	А1	А2	В1	В2
	З обмеженими можли- стями модернізації під швидкісний Рух	З техніко- економічно обгрунто- ваною можливістю модернізації під швидкісний рух	Призначені виключно для пасажирських перевезень	Призначені для змішаних пасажирських і вантажних перевезень
Розрахункова (номінальна) швидкість, км/год	160	200	300	250
Максимальна швидкість руху (на окремих ділянках)	180	220	350	280

1.2 Наукові дослідження вітчизняних вчених в галузі впровадження швидкісного та високошвидкісного транспорту

Перші серйозні наукові розробки з підвищення швидкостей руху на існуючих залізницях були виконані в 60-70-х роках минулого століття і знайшли відображення в працях О. П. Ершкова, М. А. Чернишова, А. І. Іоаннісян та інших вчених [6-8]. На особливу увагу заслуговує монографія колективу авторів присвячена високошвидкісного пасажирського руху, в якій розглянуті сфери раціонального використання високошвидкісного залізничного транспорту і його технічні можливості, особливості інфраструктури для високошвидкісного руху, соціально-економічне значення [81].

Проблемою створення в Україні високошвидкісного транспорту більше 20-ти років займається Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В Лазаряна (ДНУЗТ). Це спільні роботи з проектними інститутами Дніпродіпротранс [10, 11], Київдіпротранс [12], з Інститутом технічної механіки [13]. Співробітниками ДНУЗТ написано ряд

монографій [14-17] і наукових статей з питань ефективності спорудження ВШМ, вибору параметрів та обґрунтування окремих проектних рішень.

Так, у монографії [14] наведені результати європейського досвіду розвитку високошвидкісного залізничного транспорту, транспортні проблеми міських зон. Показана провідна роль залізничного транспорту в ХХІ столітті, його економічні та технічні переваги

В роботі [15] викладено теоретичні основи формування раціональних варіантів мережі ліній високошвидкісного руху пасажирських поїздів в Україні. Застосовано математичний апарат наближеного розв'язку оптимізаційних задач на неорієнтованих графах. Проф. А. А. Босов встановив залежність між кількістю міст, які знаходяться в зоні тяжіння, і кількістю можливих ефективних варіантів проектування високошвидкісної мережі в Україні.

Монографія [16] присвячена розробці теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення економічної ефективності високошвидкісних пасажирських перевезень з урахуванням транзитного потенціалу України. Досліджено сутність економічної категорії «швидкість пасажирських перевезень» та її вплив на термін активного життя пасажирів і на підвищення конкурентоспроможності й ефективності функціонування пасажирського залізничного транспорту. Розвинуто науковий підхід щодо визначення економічної ефективності будівництва та експлуатації високошвидкісних магістралей в Україні.

В монографії [17] викладені результати багаторічних досліджень проведених Гавриленковим О.В. з проблеми проектування швидкісних і високошвидкісних магістралей. Особливу увагу приділено питанням надійності функціонування мережі залізниць.

Питання улаштування та утримання колії на ділянках прискореного руху пасажирських поїздів при швидкостях 141-160 км/год розглянуто в окремій частині відповідної галузевої інструкції ЦП-0269, розробленою під керівництвом проф. Е. І. Даніленко [50].

Аналіз наукових робіт з окресленої проблеми показав, що питання впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів розглядались з різних позицій: соціально-економічного значення, створення нормативної бази, визначення економічної ефективності будівництва та експлуатації високошвидкісних магістралей в Україні, надійності функціонування мережі залізниць тощо. Але високі швидкості руху та потужний тяговий рухомий склад неминуче призведуть до значного росту динамічних зусиль, температурних і електромагнітних впливів на інфраструктуру залізничної колії.

1.3 Колійна інфраструктура для швидкісного руху: безстикова колія з їздою на баласті та безбаластні конструкції залізничної колії

Колія є найвідповідальнішим і найбільш витратним елементом ВШМ; якість її спорудження вирішальною мірою визначає безпеку руху, екологічні параметри ВШМ (оскільки траса здебільшого проходить у межах населених пунктів), експлуатаційні витрати на їх поточне утримання.

В даний час на високошвидкісних магістралях світу використовуються дві принципово різні конструкції залізничної колії: традиційна залізнична колія на баласті і безбаластна. Безбаластні конструкції верхньої будови колії ВШМ нерідко вважають головним інноваційним рішенням останніх десятиліть у галузі будівництва залізниць.

Під терміном безбаластна колія поєднується декілька доволі різноманітних конструкційних рішень. Суттєва різниця полягає в конструкції підрейкової основи: це може бути колія на детермінованих опорах (на шпалах, полушпалах або спеціальних блоках) та на безперервній основі у вигляді плит. При колії на окремих опорах можливі наступні варіанти: залізобетонні шпали (або полушпали) встановлені монолітно в шарі бетону, залізобетонні шпали укладені на бетонну або асфальтно-бетонну основу з анкерним кріпленням, бетонні блоки з встановленими в заводських умовах рейковими скріпленнями.

Особливої уваги в плані еволюції конструкції залізничної колії заслуговує приклад Японії. На перших лініях максимальні швидкості довгий час (більше 20 років) не перевищували 210 км/год, що практично дорівнює рівню максимальної швидкості на існуючих лініях після їх реконструкції (200 км/год).

На першій ВШМ Токіо–Осака була укладена безстикова колія з рейок масою 53,3 кг/пог. м (пізніше замінені на рейки масою 60 кг/пог. м) на залізобетонних шпалах і звичайному щебеневому баласті [186].

З огляду на сприятливі топографічні умови, на більшій частині (54 %) магістралі була застосована класична будова залізничної колії – на земляному полотні. Інша ж частина лінії (46 %) розміщувалася на тих чи інших штучних спорудах.

Досвід експлуатації цієї ВШМ в перші ж роки показав, що поточне утримання колії на баласті й земляному полотні потребує надзвичайно великих витрат. Після дощів земляне полотно місцями давало «виписки». Довелося в найнебезпечніших місцях закривати рух поїздів, укріплювати основну площадку й укоси синтетичними матеріалами, які б запобігали проникненню води в тіло земляного полотна. Крім того, інтенсивний пропуск поїздів із швидкостями 190–210 км/год в період з 6-ї до 24-ї години приводив колію в стан, який вимагав безперервної її виправки як в плані, так і в профілі. Ці роботи проводилися в нічне шестигодинне «вікно» (з 0 до 6 год) і вимагали великого штату колійних робітників.

На поточне утримання ділянок колії, що була укладена на жорсткій основі, витрати виявилися в 3–5 разів меншими. Ці обставини сприяли тому, що в подальшому був зроблений вибір на користь жорсткої основи конструкції колії і ширшого використання віадуків та естакад замість земляного полотна. До такого рішення спонукала також проблема захисту колії від снігопадів.

Як показують дослідження [197], верхня будова колії на баласті вимагає великих витрат на утримання та більш частих ремонтів колії, що не

можна сказати про безбаластну колію. Вартість обслуговування забаластованої колії згодом стає значно більшою, ніж безбаластної колії. В матеріалах Міжнародного союзу залізниць [197] надається оцінка верхньої будови колії: колія на баласті – 600-1300 €/м; колія на бетоні – 750-1700 €/м. Очевидно, вартість улаштування й експлуатації баластної й безбаластної колій залежать від рельєфу, де прокладається ВШМ і штучних споруд по трасі (мости, тунелі, віадуки).

Таким чином, наприклад, в Японії за період досить тривалої експлуатації ВШМ (з 1964 р.) утвердилося рішення щодо використання колії на плитній основі (включаючи і стрілочні переводи). Традиційна конструкція колії застосовується лише на підходах до кінцевих станцій і в їхніх межах. Таке рішення, незважаючи на більш високу початкову вартість будівництва, дозволяє суттєво (у 5 разів) знизити поточні витрати на утримання колії, надійно закріпити її геометрію. Японські спеціалісти впевнені в правильності свого вибору, і всі будівництва ВШМ зорієнтовані на використання жорсткої основи для залізничної колії.

Французькі вчені та спеціалісти також провели широкі дослідження з питань вибору оптимального типу залізничної колії [187]. У результаті наукових вишукувань була сформульована аргументована концепція з вибору конструкції головних колій для першої французької високошвидкісної магістралі – шпально-баластна колія на земляному полотні. При цьому враховувалися дві вирішальні переваги баластної колії перед плитною: великий запас стійкості колії проти поперечного зсуву від впливу рухомого складу та значно менша вартість самої конструкції, особливо там, де невелика протяжність лінії на штучних спорудах і де переважає земляне полотно. Багаторічний досвід експлуатації ВШМ Париж–Ліон підтвердив високі експлуатаційні якості, що прогнозувалися, і надійність колії на баласті. Вона укладалася і буде укладатися на інших високошвидкісних лініях Франції при швидкостях руху до 250...350 км/год.

Дещо відмінною від французької є німецька концепція колії ВШМ. Спочатку німецькі вчені та спеціалісти відмовилися від плитної основи через невивченість її якостей. Пізніше, коли виникла проблема будівництва ділянок для спрямлення траси з великою кількістю тунелів та інших штучних споруд, були проведені дослідження й випробування колії на жорсткій основі типу «Rheda». На першому етапі в цій конструкції рейкошпальну решітку заливали в бетон чи асфальт. Пізніше вирішили укласти шпали на бетон і фіксувати їх тільки з розрахунку на сприйняття поперечних сил. Обидві ці конструкції були дуже коштовні перш за все через високу вартість процесу будівництва і самих матеріалів.

У період 1996–1998 рр. проходила випробування нова безшпальна конструкція колії на жорсткій основі типу FFC (Crailsheim), у якій рейки опираються на відповідні опорні елементи, що розміщені через кожні 65 см у бетонному несучому шарі (плиті). Менші витрати матеріалів і сучасні високоомеханізовані способи будівництва значно зменшували його вартість. Але за результатом оцінки сукупності показників цієї системи на ділянках масового розміщення штучних споруд все ж було визнано доцільнішим використання верхньої будови японського типу (з корективами німецьких спеціалістів). Таким чином, Німеччина знайшла оптимальні сфери застосування баластної і плитної основ колії на мережі швидкісних та високошвидкісних доріг.

На першій іспанській ВШМ застосовувалася колія, конструкція якої, близька до французької, а на італійських лініях використана колія класичного типу.

Таким чином, можна говорити про два основні типи конструкції колії - японський (плитний) та західноєвропейський (баластний). Перший тип конструкцій колії на ВШМ, спочатку широко застосований в Японії, в даний час використовується і в багатьох інших країнах – Німеччині, Китаю, Нідерландах та ін. У країнах Європи плитна основа застосовується переважно на ділянках з великою кількістю штучних споруд.

Необхідною умовою укладання безбаластної колії на земляному полотні є максимальна стійкість і ущільнювальність його матеріалу. Слід зазначити, що в Японії до цих пір уникають укласти безбаластні колії на високих насипах. Досвід експлуатації безбаластної колії показав, що її застосування доцільно:

- на ділянках, де більше половини колії укладено на штучних спорудах (мостах, естакадах, у тунелях), щоб уникнути складних для поточного утримання переходів з баластної на безбаластну основу;

- при певних обставинах на затяжних спусках перед станціями. На цих ухилах крім дискових гальм можна також використовувати вихрострумові гальма. Викликане ними нагрівання рейок може призводити до проблем з точки зору стабільності колії на баласті;

- в кривих, де колію можна укласти з підвищенням зовнішньої рейки приблизно на 25% більшим, ніж у колії на баласті, рис. 1.1. Це є одним з найважливіших переваг безбаластної колії. Завдяки цьому при русі поїздів в тому ж діапазоні швидкості радіус кривої може бути менше, ніж на ділянці з колією на баласті. Це дає ряд переваг: траса краще вписується в рельєф місцевості; зменшується негативний вплив на навколишній ландшафт; зменшується довжина штучних споруд (тунелів і мостів).

У країнах Європи інтерес до безбаластної колії проявлявся спочатку в основному з точки зору його укладання в тунелях. У Японії ж всі нові високошвидкісні лінії майже повністю будували на жорсткій основі зі збірних плит. На основі досвіду будівництва автомобільних доріг при будівництві перших японських ВШМ були розроблені конструкції верхньої будови колії на морозостійкій основі без баластного шару, які згодом отримали назву безбаластної колії або колії на жорсткій основі.

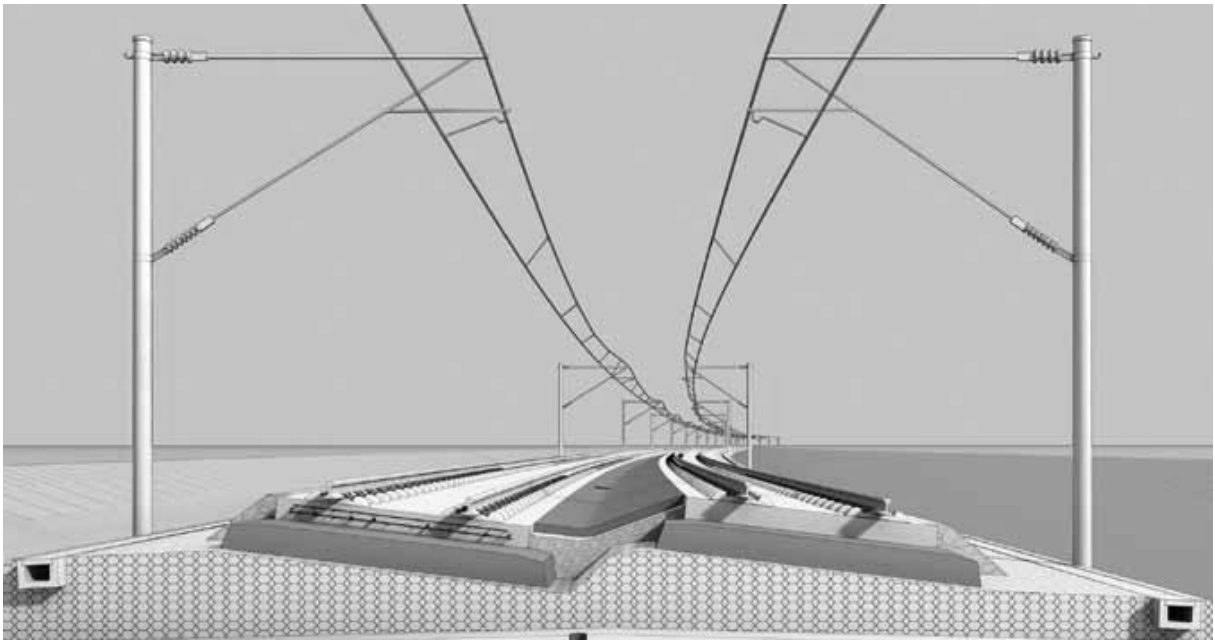


Рисунок 1.1 – Безбаластна конструкція колії в кривій ділянці [188]

Застосування безбаластної конструкції не як складової штучної споруди, а з обпиранням на ґрунт не вирішує проблеми для ділянок з проблемними (м'якими або нестійкими) ґрунтами, а навпаки, не може бути побудовано до повної стабілізації ґрунтової основи. Експериментальні дослідження напружень в земляному полотні під плитою безбаластної колії, виконані за допомогою встановлених месдоз [189], підтвердили, що безбаластна конструкція колії більш рівномірно розподіляє вертикальні напруження на основній площадці і в тілі земляного полотна, але їх затухання відбувається менш інтенсивно, в порівнянні з класичною конструкцією на баласті, тим самим залучаючи до роботи під дією рухомого складу більшу товщу ґрунтів земляного полотна. В результаті це приводить до зростання вертикальних напружень на основній площадці земляного полотна.

Велика жорсткість підрейкової основи приводить до зменшення довжини лінії впливу сил, виникненню значних динамічних добавок інерції при проходженні рухомим складом яких-небудь нерівностей на колії. Крім того, для жорсткої безбаластної колії збільшується частота вібрацій при русі поїзда в порівнянні з колією на баласті при інших рівних умовах. Наприклад,

[illegible]

1 – рейка Р65; 2 – рейкове скріплення Vossloh; 3 – двоблочна шпала; 4 – залізобетонна несуча плита; 5 – несучий шар бетону; 6 – поперечна арматура; 7 – поздовжня арматура

В деяких роботах категорично заперечується застосування баластної конструкції колії для швидкостей руху більше 250 км/год, серед іншого, пояснюючи це появою ефекту аеродинамічного підйому щебінок під час проходження поїзду. Але ці питання можуть бути вирішені більш простими засобами, наприклад, поливом поверхні баластної призми в'язучим матеріалом.

Питання вибору конструкції залізничної колії в умовах впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні до цього часу не вирішене. З вище наведених прикладів випливає, що на тих чи інших напрямках можуть застосовуватись як баластні, так і безбаластні конструкції колії.

1.4 Огляд стану питань з математичного моделювання взаємодії рейкової колії і рухомого складу

Задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу є базовими для більшості напрямків сучасних наукових досліджень залізничного транспорту. Тому дослідженню таких питань присвячені роботи багатьох провідних вчених.

Під керівництвом проф. Е. І. Даніленка вийшло декілька нормативних документів – «Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України» (ЦП-0269) [18], «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» (ЦП-0117) [22] та ін. Також проф. Е. І. Даніленко є автором навчальних посібників [21, 23] та концептуального підручника в 2-х томах «Залізнична колія», [19, 20] де викладено основи питань взаємодії. Різноманітні питання напружено-деформованого стану залізничної колії є темою багатьох його праць – [24-27] та ін.

Проф. С. В. Мямлін досліджував питання моделювання динаміки рухомого складу при взаємодії з залізничною колією, результати яких викладено в монографії «Моделирование динамики рельсовых экипажей» [28] і низки наукових праць [29-32] та ін.

Динамічні процеси руху поїздів по залізничній колії досліджено в роботах проф. В. Ф. Ушкалова – [33-35] та ін., проф. М. О. Радченко – [40-42] та ін.

Задачам напружено-деформованого стану земляного полотна присвячена низка робіт проф. В. Д. Петренко – [36-39] та ін., д.т.н. О. Л. Тютюкіна – [36, 38, 39, 47-48] та ін.

Задачі взаємодії колії і рухомого складу в особливих умовах експлуатації вирішувалися в монографії проф. О. М. Даренського «Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту» [43] та низкі робіт – [44-46] та ін.

Рішення питань напружено-деформованого стану елементів залізничної колії є невід'ємною частиною великої кількості різноманітних задач пов'язаних з проектуванням нових конструкцій, поліпшенням устрою й оцінкою стану існуючих конструкцій, оптимізацією умов експлуатації й т.п. На сьогоднішній день в області фізико-математичних наук існує досить велике різноманіття математичних моделей, які надають можливість вирішувати поставлені завдання в тому або іншому вигляді. Окремі з них уже знайшли своє застосування безпосередньо для моделювання роботи залізничної колії. У деяких випадках використовується опис залізничної колії як цілісної системи. У деяких, навпаки, досить обмежитися моделюванням окремого елемента (рейка, шпала тощо) або сполученням декількох елементів (наприклад, передача напруження від шпал на основну площадку земляного полотна через баласт у розрахунках колії на міцність). У більшості випадків сучасні методи розрахунків являють собою поєднання теоретичних основ і емпіричних корегувань, які базуються на багаторічному досвіді експериментальних досліджень. Такий симбіоз дає можливість одержувати компроміс між складністю й громіздкістю розрахунків з однієї сторони та адекватністю отриманих результатів для відповідних завдань з іншої.

Напевно, оцінити стан питань з математичного моделювання взаємодії рейкової колії і рухомого складу можна проаналізувавши, які саме

моделі й для вирішення яких задач використовуються у сучасних наукових дослідженнях. Тому далі надається короткий огляд дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю «Залізнична колія», що виконувалися в Україні за останнє десятиріччя.

Бондаренко І. О. у 2006 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи» [50] розробила модель конструкції залізничної колії для дослідження процесів деформації підрейкової основи з використанням *методу скінчених елементів*. Конструкція залізничної колії була представлена як збірка елементів: рейки, скріплення, підкладки, баласт, земляне полотно. Основними вихідними даними для моделі були геометричні розміри та фізичні властивості кожного елементу. Навантаження конструкція для відображення дії рухомого складу відбувалося двома постійними вертикальними силами, що прикладалися до об'єктів, які моделювали праву та ліву рейкові нитки. Результатами розрахунків за моделлю була низька параметрів напружено-деформованого стану елементів залізничної колії. Таким чином, було вирішено задачу комплексної оцінки впливу різних факторів на величину модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині для обґрунтування і розробки методики визначення модуля пружності підрейкової основи залізничної колії для інженерних розрахунків.

Талавіра Г. М. у 2007 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Особливості роботи залізничної колії на перехідних ділянках примикання до мостів» [51] розробив математичну модель взаємодії колії і рухомого складу для чотирьохвісного пасажирського вагону при русі по колії з геометричними параметрами передмостової нерівності. Результатами розрахунки за складеною *системою диференціальних рівнянь* є характеристики зміни вертикальних сил дії на колії в часі проходження вагону. Таким чином отримано інструмент для вирішення

питань динамічної взаємодії між колією і рухомим складом на ділянках підходу до мосту.

Баль О. М. у 2008 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення ефективності ведення рейкового господарства за показниками надійності» [52] розробила модель життєвого циклу роботи рейок у колії за допомогою *теорії графів*. Модель включає всі види дефектів і систему технічного обслуговування рейок. Було враховано переходи утворення одного виду дефекту в інший та можливі зміни станів рейок, що являють собою інтенсивності відмов та інтенсивності відновлення. У результаті була вирішена задача удосконалення методики визначення інтенсивності різних видів відмов рейок у колії та надана оцінка впливу на відмови експлуатаційних факторів.

Костюк М. Д. у 2008 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Удосконалення конструкцій і технологій верхньої будови колії для сучасних умов експлуатації залізниць України» [53] удосконалив методику *розрахунку колії на міцність* [22] і методику розрахунків поздовжньої та поперечної стійкості рейкової колії. За результатами розрахунків було обґрунтовано ефективність використання нових запропонованих конструкцій верхньої будови колії і технологій їх укладання, ремонтів та експлуатації. В тому числі визначено сфери раціонального застосування менш щільної епюри залізобетонних шпал.

Сисин М. П. у 2008 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Вплив фізичних та геометричних характеристик залізничної колії на її напружено-деформований стан» [54] розробив модель динамічної взаємодії колії та рухомого складу, яка складається із моделі екіпажу та моделі колії. Модель екіпажу складається із семи мас, кожна з яких має 2 ступені свободи, які з'єднані між собою пружно-дисипативними зв'язками. Частина моделі, яка відповідає залізничній колії, складається із двох еквівалентних мас для кожного колеса. Верхня маса відповідає приведеній масі рейки та вузла скріплення, а нижня – приведеній масі

підрейкової основи. Математично модель складається з *системи диференціальних рівнянь*, розв'язання яких дає можливість отримати результати у вигляді динамічного процесу – в залежності від часу руху. Побудована модель дає змогу змодельовати процес взаємодії колії та рухомого навантаження при проходженні ним силової нерівності з різними швидкостями, різною формою нерівності, різноманітними фізичними та геометричними характеристиками колії та рухомого навантаження.

Харлан В. І. у 2010 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Вибір раціональних швидкостей руху пасажирських поїздів на ділянках міжнародних транспортних коридорів» [55] удосконалив модель залізничної колії для знаходження оптимальної стратегії перебудови існуючих залізниць з урахуванням сучасного фінансового положення при обмеженому інвестуванні проектів і життєвого циклу роботи залізничної колії. В основу покладено *модель векторної оптимізації* функції множини [15]. Вихідними даними для такої моделі є множина об'єктів, яка складається з послідовності окремих ділянок залізничної колії, що характеризуються існуючою швидкістю руху, діапазоном можливих швидкостей, яким відповідають необхідні рівні інвестицій та характеристики експлуатації для подальшого утримання ділянки у відповідному стані.

Арбузов М. А. у 2010 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Вдосконалення системи контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії» [56] розробив просторову модель роботи безстикової колії. Результатом розрахунків за моделлю є розподілення внутрішніх поздовжніх напружень по поперечному перетину рейки. Це дало змогу розробити і обґрунтувати методику вимірювання відхилення температури рейки від її нейтральної температури та прогнозування розподілення нейтральної температури по довжині пліті.

Твердомед В. М. у 2010 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Вплив поперечних та поздовжніх горизонтальних сил на роботу безпідкладкової та підкладкової конструкції рейкової колії» [57] удосконалив *модель силового вписування* візка екіпажу при русі в кривій для визначення горизонтальних поперечних сил взаємодії між колесами рухомого складу та конструкцією колії на залізобетонних шпалах. Удосконалення полягало в урахуванні повздовжніх стискаючих сил та конструктивних особливостей автозчепних приладів.

Чернишова О. С. у 2010 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення ефективності заходів зі зменшення обмежень швидкості руху поїздів, зумовлених станом залізничної колії» [58] розробила модель ділянки залізничної колії для оцінки впливу обмежень швидкості руху поїздів на додаткові витрати залізниці. Модель утворено поєднанням методики *тягових розрахунків* та апроксимації кореляційного аналізу впливу низки експлуатаційних факторів. Розроблена модель застосовується для попередньої оцінки економічної ефективності від усунення обмежень швидкості. Особливо це має значення при великій кількості ділянок обмеження і їх усунення в умовах обмежених фінансових ресурсів.

Губар О. В. у 2011 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Обґрунтування норм улаштування та утримання колії для кривих з радіусами менше 350 метрів» [59] удосконалив *модель силового вписування* візка екіпажу при русі в кривій з метою врахування нерівномірного завантаження колісних пар. Це дало змогу виконання детальних розрахунків параметрів взаємодії рухомого складу і колії в залежності від радіусу кривої. В результаті було розроблені і обґрунтовані норми улаштування колії на залізобетонних шпалах у кривих ділянках колії з радіусами кругових кривих менше 350 м.

Каленик К. А. у 2011 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Удосконалення нормативів утримання бокового

напрямку стрілочних переводів за шириною колії та у плані» [60] розробив просторову математичну модель руху вантажного піввагона в межах бокового напрямку стрілочних переводів. Модель піввагону представлена механічною системою, що складається з 7 твердих тіл (кузов два візки та 4 колісні пари), верхня будова колії в моделі є балкою без маси з перемінною жорсткістю по довжині у вертикальній та горизонтальній площині. Особливістю моделі є те, що геометрія перевідної кривої вводиться за допомогою ординат зовнішньої та внутрішньої рейкових ниток, що дає можливість визначати відцентрове прискорення безпосередньо під час розрахунків, як наслідок зміни траєкторії руху. Результатом розрахунків за системою диференціальних рівнянь є динамічні переміщення та прискорення і сили по кожному складовому тілу моделі у часі. Застосування такого підходу дало змогу вирішити задачу удосконалення діючих нормативів утримання стрілочних переводів.

Гусак М. А. у 2012 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення ефективності роботи залізничної колії при спеціалізації напрямків для вантажних і пасажирських перевезень» [61] розробила модель раціонального розподілу вантажо- і пасажиропотоків з метою забезпечення мінімуму одного або декількох експлуатаційних показників. Мережа залізниць представляється у вигляді графа. Задача вирішується на основі векторної оптимізації. З використанням моделі було вирішено задачу визначення раціонального розподілу поїздопотоків між паралельними ходами для підвищення ефективності роботи залізничної колії за рахунок спеціалізації напрямків перевезень.

Набоченко О. С. у 2013 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення ефективності роботи щебеневого баластного шару залізничної колії» [62] розробила математичну модель короткотривалих і довготривалих процесів взаємодії рухомого складу та залізничної колії, яка враховує: динамічну взаємодію залізничної колії з рухомим складом; розладнання баластного шару при багатократній дії

рухомого складу; нелінійність роботи підрейкових опор й баластного шару при взаємодії колії та рухомої квазістатичної сили; внутрішні динамічні процеси руху частинок щебеню та шпали у баластному шарі. Моделювання динамічної взаємодії колії та рухомого складу виконується шляхом розв'язання системи взаємозв'язаних *диференціальних рівнянь* згідно розрахункової схеми що складається з трьох балок, з'єднаних Вінклерівською основою. Рухомий склад описується двомасовою системою з невіднесеною та наднесеною мас.

Панченко П. В. у 2014 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Обґрунтування норм утримання залізничної колії у плані при прискореному русі» [63] удосконалив математична модель просторових коливань пасажирського вагона при русі по колії з горизонтальними нерівностями. Удосконалення моделі полягає в тому, що для опису руху в криволінійних ділянках колії отримані аналітичні залежності бічних відхилень рейок у перехідній і круговій кривих у тій же системі координат, у якій записані *диференціальні рівняння* коливань вагона. Це дозволило створити загальну модель руху вагона як у прямих, так і в криволінійних ділянках, математично описати підвищення зовнішніх рейок, розширення колії та наявні нерівності. В результаті застосування моделі була вирішена задача визначення нормативів утримання колії у плані при швидкостях руху поїздів 140...160 км/год.

Бугаєць Н. В. у 2014 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення несучої здатності рейкошпальної основи залізничних колій незагального користування» [71] використовувала *метод скінченних елементів* для дослідження напружено-деформованого стану залізничних колій незагального користування. Використання такої моделі, дозволило визначати не тільки напружено-деформований стан рейкошпальної основи, але і встановлювати місця концентрації і нерівномірності напружень. Це дало змогу обґрунтувати засоби посилення підрейкової основи для різних умов експлуатації ділянок залізничної колії.

Демченко В. О. у 2014 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Вплив профілю колісного бандажа на силову взаємодію з рейковою колією» [202] застосував модель руху колісної пари з урахуванням зносу коліс, розроблену в програмному продукті «Универсальный механизм» (*система диференціальних рівнянь, складених за принципом Лагранжа-д'Аламбера*). Отримані результати були використані в тому числі для налаштування математичної моделі коливань колісної пари, як механічної системи з двома ступенями свободи, розробленою автором вказаної роботи для розв'язання задач визначення допустимих та оптимальних обрисів колеса.

Клименко А. В. у 2015 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Підвищення ресурсів роботи залізничних колій незагального користування за рахунок вдосконалення утримання рейкових стиків» [200] удосконалив модель розрахунку залізничної колії, як *балки на багатьох пружньо-дисипативних опорах* з нелінійними характеристиками на згин [70]. Процес розв'язання рівнянь математичного представлення моделі було здійснено в матричній формі з використанням рівнянь Крамера. Запропоновані удосконалення дали можливість враховувати вплив динамічного навантаження під час проходження зона рейкових стиків.

Маркуль Р. В. у 2015 р. в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Розробка технології контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5» [201] застосував просторову математичну модель роботи залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 під дією рухомого складу для дослідження напруженого стану у елементах вузла скріплення, створену в ANSYS (*метод скінченних елементів*). Було вирішено питання встановлення найбільш імовірних місць появи найбільших напружень в елементах вузла рейкового скріплення, що надало матеріал для розробки технології контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5.

Якщо проаналізувати моделі, які звичайно застосовуються для розрахунків залізничної колії, то їх можна розділити на кілька груп. **Перша група** – це *аналітичні моделі*, як правило, доведені до інженерного розрахунку. Вони складаються з набору формул, заснованих на законах фізики та на апроксимації результатів експериментальних досліджень або, в деяких випадках, на апроксимації більш складних теоретичних залежностей. В більшості випадків це варіації моделей побудовані на плоских розрахункових схемах статичної рівноваги між деформацією об'єкта й прикладеної до нього силою. Зв'язок між деформацією й силою визначається за основними формулами фізики. Динамічний характер навантаження враховується умовним збільшенням значення сили. Спільна дія декількох сил приводиться до одної еквівалентної. Такі методики мають цілий ряд спрощень, припущень і емпіричних коефіцієнтів. Але слід вказати і їхні переваги. Більшість аналітичних залежностей оснований на законах класичної фізики, що робить їх апріорі вірними і дає змогу одразу за змістом формул зрозуміти від яких факторів і в якій мірі залежить кінцевий результат. Як правило, є можливість безпосереднього розрахунку саме потрібного показника, виключаючи необхідність подальшого математичного аналізу масиву отриманих даних. Безпосередній зв'язок між результатом і вихідними даними робить можливим вирішення задач не тільки в прямій, а й в зворотній постановці.

На сьогодні такі моделі продовжують удосконалюватися, що пов'язано з їх адаптацією до нових конструкцій колії, умов експлуатації та з застосуванням сучасних математичних методів, таких як теорія графів, оптимізаційні алгоритми тощо.

Друга група – це моделі, оснований на *системі диференційних рівнянь другого роду, складених за принципом Лагранжа-д'Аламбера*. Вони базуються на розрахунковій схемі динамічної рівноваги між прискореним рухом тіл з масою та обмеженнями, що накладаються на можливість їх сумісного переміщення. Як правило, це просторові системи, хоча не

виключається й використання плоскої двовимірної схеми. Найчастіше між тілами використовують жорсткі зв'язки, які показують зв'язок між силою та зміною лінійного або кутового взаємного положення тіл, і дисипативні зв'язки, які обмежують швидкість зміни положення тіл. Математичним описом такої моделі є система диференціальних рівняння другого ступеня. Для їх вирішення потрібно застосування загального або спеціального програмного забезпечення. На сьогоднішній день математичних інструментів для обчислення таких моделей чимало, що сприяє їх широкому застосуванню.

Як правило, математичні моделі, засновані на системі рівнянь Лагранжа другого роду, носять вузько спрямований напрямок. Але сьогодні спостерігаються спроби створення програмних продуктів і більш широкого призначення, наприклад, програмний продукт «Универсальный механизм» [64].

Безперечною перевагою таких моделей є отримання результатів в динаміці, тобто в залежності від часу. Це дає можливість вирішувати задачі, в яких недостатньо знати тільки середні або максимальні значення, а потрібно оцінювати й характер їх зміни у часі.

До недоліків таких моделей слід віднести певні математичні обмеження. Як правило приймається постійна маса тіл, що взаємодіють, лінійність зв'язків між ними, постійна швидкість руху, незмінність геометрії самих тіл (деформації системи визначаються зміною сумісного положення тіл, а не їх власною деформацією), незмінність фізичних (перш за все пружних) характеристик тіл тощо. Спроби усунення таких припущень значно ускладнює розв'язання системи рівнянь, а в більшості випадків, взагалі унеможлиблює отримання рішення з потрібною точністю.

Окремо слід звернуту увагу, що система тіл, описана рівняннями Лагранжа другого роду може мати локальну або глобальну систему координат. З точки зору математичних інструментів це не має принципової різниці, але несе суттєві від'ємності для практичного застосування. Локальна

система координат передбачає, що центр координат рухається разом з системою, як правило його розташовують в центрі ваги найкрупнішого тіла, наприклад, кузова вагону. Тоді координати всіх тіл на кожному кроці розрахунку є переміщеннями відносно цієї точки. На кожному кроці розрахунку вони мають значення приблизно одного порядку, як між собою, так і між значеннями на інших кроках. Такий підхід підтримує певну точність результатів розв'язання системи рівнянь на кожному кроці в кожному напрямку. Однак, такий опис умовно представляє, що вагон ніби стоїть на місці (не рухається поздовж колії), а тільки здійснює коливання (на одному місці). Локальні нерівності колії задаються у тій самій локальній системі координат, а глобальна зміна траєкторії руху враховується прикладанням відповідних зовнішніх сил. Так, наприклад, рух по кривій задається прикладанням до тіл відповідної відцентрової сили.

Глобальна система координат встановлює постійну точку центра координат, положення якої не змінюється під час усієї послідовності розрахунків. Це спрощує механізм опису положення колії і дає можливість задавати її просторове положення як масив координат. Перевагами такого підходу є, по-перше, можливість задавати будь-який обрис колії, в тому числі за результатами дійсної зйомки; по-друге, сили, що виникають від зміни траєкторії руху, будуть розраховуватися, як наслідок, а не задаватися, як вихідні дані. Однак всі переміщення окремих тіл вагону також будуть визначатися відносно первинно заданого центру координат, що погіршить точність розрахунків.

Таким чином, для задач, в яких досліджується саме динаміка рухомого складу, використовують локальну систему координат – це більш поширений варіант. В окремих випадках, коли важливо дослідити динаміку руху в залежності саме від геометрії колії, використовують глобальну систему координат [65, 60, 63].

Складання моделі за допомогою системи рівнянь Лагранжа другого роду знайшло дуже широке застосування для вирішення задач динаміки

рухомого складу. Використання такого підходу для моделювання роботи безпосередньо конструкції залізничної колії мало місце в деяких роботах, але все ж таки можна вважати це майже неприйнятним. У динаміці твердого тіла приймається, що об'єкт має постійну масу, сила, прикладена до точки об'єкта, миттєво приводить до переміщення всі інші його точки і тіло рухається як одне ціле відносно центра мас. Розділяти залізничну колію на цілісні об'єкти з постійною масою можна тільки умовно. Причому ці маси будуть мати невеликі за значенням переміщення, які будуть відбуватися за короткий проміжок часу.

Третя група – це наближені теорії пружних середовищ, засновані на різних гіпотезах про характер деформації шарів матеріалів або наближених методів, таких, як метод сіток, *метод скінченних елементів – Finite Element Method (FEM)* та інші. Такі варіаційні методи з появою потужних комп'ютерів набули широкого застосування. До їхніх недоліків потрібно віднести необхідність у добротному генераторі триангуляції і складності одержання апріорних і аналітичних оцінок. Такі моделі ґрунтуються на принципах статичної теорії пружності, де розглядається тіло, що перебуває в стані рівноваги під дією прикладених сил, причому вважається, що пружні деформації вже досягли статичних значень. Такі трактування втрачають необхідну точність для завдань, у яких час між моментом прикладання навантаження і встановленням дійсної рівноваги може порівнюватись з часом дії або зміни навантаження. Це актуально для високих швидкостей руху, а так само для задач, для яких мають значення не тільки максимальні напруження, а й їхня циклічність і зміна в часі.

Однак в цілому, метод скінченних елементів набув досить широке застосування для вирішення різноманітних задач, пов'язаних саме з дослідженнями напружено-деформаційного стану залізничної колії. Враховуючи принципову різницю в моделюванні рухомого складу (система окремих твердих тіл постійної маси з певними зв'язками) і моделюванні залізничної колії (система шарів різної пружності з малими, у порівнянні з

власними розмірами, деформаціями, які відбуваються майже миттєво), все частіше в сучасних дослідженнях використовується послідовне застосування двох різних моделей. За допомогою моделі з детальним описом рухомого складу (як правило система рівнянь Лагранжа другого роду) і спрощеним описом залізничної колії визначаються сили, що передаються від коліс на рейку. Потім, до моделі з детальним описом залізничної колії (як правило за допомогою методу кінцевих елементів) прикладаються визначені сили. Такий підхід можна спостерігати, наприклад, в роботах [70-71].

Таким чином, на сьогодні існує широкий спектр засобів математичного моделювання для дослідження питань взаємодії залізничної колії та рухомого складу. Враховуючи постійний розвиток конструктивних елементів колії, зміну умов експлуатації, появу нових одиниць рухомого складу тощо з одного боку, та прогрес у розвитку фізико-математичних засобів розрахунків та комп'ютерних систем їх реалізації з іншого, математичні моделі продовжують удосконалюватися та розвиватися. Тому при виборі математичної моделі для нового дослідження неможна надати однозначної рекомендації. Потрібно враховувати багато факторів і приймати рішення на основі адекватності моделі щодо конкретної задачі. Напевно, виходячи зі специфіки даного напрямку досліджень, в якості головного показника адекватності повинно виступати порівняння теоретичних розрахунків з результатами експериментальних вимірів.

1.5 Передумови застосування просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності

В залежності від задачі, що вирішується, можуть використовуватися як відносно прості плоскі розрахункові схеми, так і розвинені моделі, які описуються системами з десятками рівнянь. Незважаючи на те, що завжди йдеться про процес взаємодії колії і рухомого складу, все ж такі задачі, що спрямовані на дослідження рухомого складу, і ті, що спрямовані на дослідження залізничної колії, мають принципові відмінності. Моделі

рухомого складу – це, в більшості випадків, системи руху (коливань) набору пов'язаних між собою твердих тіл. Як правило для математичного опису таких моделей використовують системи рівнянь диференційних другого роду, складених за принципом Лагранжа-д'Аламбера. Роботу залізничної колії більш природно описувати не через переміщення тіл, а через їх деформації. Тому для математичного опису залізничної колії доцільно застосовувати моделі, що основані безпосередньо на теорії пружності або на її числових реалізаціях у вигляді FEM та інших. Поєднання різних підходів в одну модель суттєво ускладнює їх створення і подальше застосування, тому для більшості задач є непрактичним.

Таким чином, моделі залізничної колії в більшості випадків зводяться до системи тіл (або шарів), що мають пружні деформації під впливом навантаження. Такі моделі, як правило, є квазістатичними: однією з головних умов, що закладається при їх створенні, є те, що деформації від прикладеного навантаження виникають миттєво і в повному сталому обсязі (як при статичному навантаженні), а динаміка процесу враховується відповідними рівняннями прикладеного навантаження, до статичного значення якого додаються необхідні доповнення.

Збільшення швидкостей руху поїздів вимагає не тільки відповідних технічних, а й методично-розрахункових засобів. Багато моделей та методик, що використовуються для вирішення задач напружено-деформованого стану залізничної колії, базуються на допущеннях і гіпотезах адекватних тільки для певних рівнів швидкості руху.

В якості реакції на навантаження від проходження рухомого складу в залізничній колії виникають пружні деформації та відповідні напруження. Вигин та стискання шарів залізничної колії відбувається дуже швидко, але все ж таки не миттєво. Час на реагування безпосередньо залежить від швидкостей поширення пружних хвиль у матеріалі відповідного елементу колії. Зрозуміло, що у випадках, коли швидкість навантаження (руху поїзда) одного рівня зі швидкістю реакції, процеси взаємодії набувають суттєво

інших виглядів у порівнянні зі статичним навантаженням. Враховуючи те, що для більшості матеріалів, з яких складається залізнична колія, швидкості поширення хвиль значно перевищують можливості навіть сучасних швидкісних поїздів, це питання не потребувало уваги. Але на сьогодні ця думка змінюється на протилежну, особливо, коли йдеться про залізничну колію на слабких ґрунтах, в яких швидкість поширення хвиль не так вже й велика. В деяких роботах навіть почав з'являтися термін «ґрунтовий удар» по аналогії зі звуковим ударом [72, 73].

Так на ділянці залізниці, що проходить по набережній Стілтон у Великобританії фіксувалась різка зміна прогинів колії на швидкостях 180 км/год. Пояснення знайшли у наявності під баластом м'яких ґрунтів, а саме торфу та мулистій глини [74].

У Нідерландах на ділянці між Амстердамом і Утрехтом проводились тести щодо вимірювання швидкостей поширення хвиль в ґрунті для можливості проходження французького поїзда TGV зі швидкостями більше 160 км/год на ділянках з насипами, що складалися із слабких ґрунтів [75].

На південно-заході Швеції на ділянці Гетеборг–Мальме швидкість швидкісного поїзда X2000 була обмежена до 160 км/год через хвильові явища в ґрунті [76].

Наявність певних проблем в експлуатації залізничної колії на слабких ґрунтах зазначається й на деяких ділянках залізниць Угорщини [77].

Питання щодо появи запізнювання прогину рейки при високих швидкостях руху підіймалися в роботі австрійських авторів [78], де, окрім теоретичних міркувань, були наведені результати експериментальних підтверджень відповідних ефектів на дослідних ділянках біля Відня при швидкостях руху більше 230 км/год.

Таким чином, для вирішення поставлених задач в сучасних умовах потрібна принципова нова модель напружено-деформованого стану залізничної колії, яка, серед інших, повинна мати наступні якості:

- просторова (тривимірна) розрахункова схема, яка має надавати можливість визначати напруження (деформації) в будь якій точці конструкції залізничної колії – не обмежуватись віссю дії сили, поверхнею контакту шарів, центрами ваги об'єктів тощо;
- описувати пружні деформації залізничної колії, як процес, який відбувається в часі (динамічний) – відмовитись від припущення миттєвості деформацій;
- описувати простір поширення пружних деформацій залізничної колії в часі – враховувати, яка саме частина обмеженого і напівобмеженого простору підрейкової основи приймає участь у взаємодії з прикладеними силами на дану мить часу;
- визначати напруження (деформації) як масиви значень за чотирма аргументами (три просторові координати і показник часу взаємодії);
- задавати зовнішнє навантаження як сили, що рухаються, які змінюють в часі не тільки значення, а й координати прикладання.

Створення такої моделі буде здійснюватися як розв'язок *динамічної задачі теорії пружності*. Основні засади фізико-математичного розв'язання таких задач були описані ще в працях Ландау [79], а потім знайшли розвиток у багатьох роботах відомих фізиків. Залізнична колія є доволі складною конструкцією з точки зору теорії пружності: поєднання обмежених та напівобмежених просторів з різними пружними властивостями з обпиранням більш жорстких шарів на більш м'які, в яких виникають як деформації, так і переміщення, тощо. Тому залучення таких фізико-математичних засобів до моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії стало можливим тільки з відповідним розвитком обчислювальної техніки, що дало можливість отримувати задовільні за часом і точністю розв'язання громіздких систем рівнянь.

Основу моделі складатиме динамічна задача теорії пружності, в рамках якої буде описуватися динамічна рівновага деформацій шарів з урахуванням сумісності деформацій та співвідношень між деформаціями і

напруженнями. Враховуючи обов'язковість урахування течії процесу в часі, для кожного часового кроку інтегрування буде визначатися обрис фронту поширення деформацій. Відомо, що для тіл в твердому стані фронт поширення деформацій описується рівняннями поширення в матеріалі пружної просторової хвилі коливань.

Таким чином, модель напружено-деформованого стану залізничної колії буде полягати в поєднанні рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на дану мить часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації.

Такий підхід можна вважати принципово новим. При цьому, обов'язково слід назвати роботи проф. М. В. Веріго і проф. А. Я. Когана [80]. Вирішуючи задачі розрахунків колії на міцність, вони, в тому числі, розглядали використання просторових і динамічних розрахункових схем, але на основі іншого фізико-математичного апарату.

Враховуючи те, що геометрія поширення деформацій описується рівняннями фронту руху просторової хвилі, автор ввів терміни «хвильова модель» або «модель на основі хвильової теорії розповсюдження напружень», які застосовувалися ним в низці друкованих праць: [68, 69, 82, 108] та ін. Як показав час, в багатьох випадках за такою термінологією модель помилково сприймається як інструмент для вивчення поширення вібрацій від залізничної колії. Крім того, геометрія поширення хвиль є тільки одним з декількох задіяних інструментів, і така назва, дійсно, не точно відображає сутність моделі. Тому в даній дисертаційній роботі автором буде застосовуватися більш відповідна назва – *просторова модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності*.

1.6 Існуючі підходи застосування теорії пружності для вирішення задач взаємодії

Як було вказано раніше, поставлена задача є відомою в загальному вигляді для теорії пружності. Тому можна назвати багато літературних

джерел, на які можна спиратися для потрібного прикладного застосування теорії пружності. Зокрема, автором були використані роботи [79, 83–90, 236–239] та інші. Загальні положення для задач поширення хвиль ґрунтувалися на роботах [91–94]. Також на сьогодні є багато робіт в області фізико-математичних наук, присвячених безпосередньо опису напружено-деформованого стану твердих речовин як хвильового процесу; автор використовував наукові праці [95–100].

Так в монографії [83] розглянуті аналітичні методи розв’язання задач механіки контактних взаємодій пружних тіл. Особлива увага надана принцип складання систем диференціальних рівнянь для рівноваги на поверхні тіл, обмежених геометричних розмірів, у тому числі з урахуванням неоднорідностей поширення напружень по гранях тіл. Цей матеріал буде корисний для опису напружено-деформованого стану таких елементів залізничної колії, як шпали, підкладки і т.п. при їх контакті з півобмеженим пружним середовищем.

В монографії [84] викладені розв’язання просторових задач теорії пружності з використанням узагальнених аналітичних функцій. В підручнику [236] наведені основні підходи щодо плоских задач теорії пружності, але, крім того, надана увага врахуванню теорії поширення пружних хвиль в необмеженому середовищу і контактним задачам Герца. Схожі задачі з урахуванням нерівнопружності та теплопровідності середовища описані в монографії [237].

Розгорнутий систематизований опис теорії поширення і взаємодії пружних хвиль в твердих тілах наведено в монографії [96]. В наступній роботі цих авторів [97] дослідження біли доповнені аналізом дисперсійних, дисипативних ті нелінійних ефектів.

Безпосередньо математичним засобам розв’язання задач теорії пружності присвячена монографія [238], яка ґрунтується на теорії диференціальних рівнянь в частних похідних та на підходах математичного

аналізу та монографія [89], в якій увага надається врахуванню роботи тіл на вигин.

В монографії [100] викладено практичні числові методи розв'язання просторових задач теорії пружності для тіл складної геометричної конфігурації.

Розв'язання задач контактної взаємодії, в тому числі з урахуванням тертя, динаміки і теплообміну досить докладно викладено в монографії [239].

Окремо слід назвати монографію Г. Кольского «Волны напряжения в твердых телах» [94], викладені в ній дослідження були взяті автором, як загальна основа математичної реалізації розв'язання задач теорії пружності з урахуванням поширення пружних хвиль, теоретичні основи якої були розроблені в роботах Л. Д. Ландау [79].

Врахування теорії поширення хвиль для досліджень безпосередньо в прикладній формі задач, пов'язаних з розрахунками взаємодії залізничної колії і рухомого складу, в тому чи іншому варіанті можна побачити в низки робіт закордонні вчених: D. P. Connolly, M. Forde, G. Kouroussis, V. V. Krylov та ін.

Так, задачі розрахунків залізничної колії для швидкостей, які наближаються до швидкості поширення хвиль того чи іншого типу поставлено в роботах V. V. Krylov – [240, 241]. В роботі D. P. Connolly і M. C. Forde «Use of Conventional Site Investigation Parameters to Calculate Critical Velocity of Trains from Rayleigh Waves (Застосування параметрів ділянки для розрахунку критичної швидкості поїздів на основі хвиль Релея)» [231] описується процес виникнення поверхневих хвиль при проходженні по ділянці рухомого складу. В результаті дається методика визначення швидкості поширення вібрації в ґрунті в зоні примикання до залізничної колії за класичними формулами опису хвиль Релея, зроблені висновки щодо необхідності обмеження швидкості руху поїздів при наближенні до критичних значень. Цю роботу можна вважати завершенням низки попередніх досліджень, викладених в роботах [232–234].

Цей напрямок досліджень було продовжено в роботі G. Kouroussis (у співавторстві з D. P. Connolly та іншими вченими) – «Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration (Залізничні виїмки і насипи: експериментальні та аналітичні дослідження вібрації ґрунту)» [235]. Теоретичні дослідження було доповнено і співставленні з експериментальними вимірюваннями на трьох швидкісних залізничних ділянках. Отримані результати, на фоні загального співподання даних з теоретичними, все ж таки показали наявність більш складних залежностей характеристик вібрацій у порівнянні з аналітичними передумовами.

1.7 Висновки до розділу 1

Одним із пріоритетних напрямків розвитку залізничного транспорту України є підвищення швидкості руху пасажирських поїздів та подальше впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі і високошвидкісного, руху як в Україні, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Забезпечення високих швидкостей руху поїздів повинно ґрунтуватися на наявності відповідних методико-розрахункових та нормативних документів. Українські вчені створили достатньо практично-теоретичну базу для вирішення таких задач. Але більшість існуючих методик ґрунтується на підходах доцільних тільки до певного рівня швидкостей. Тому потребує вирішення галузева проблема – створення методології (системи методів, засобів і стратегій) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом. Для цього потрібно вирішити низку задач:

- розробити рекомендації щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану залізничної колії з обґрунтуванням меж їх застосування.

- розробити математичну модель взаємодії колії та рухомого складу, яка дозволить визначати напружено-деформований стан залізничної колії з

повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів.

- проаналізувати особливості впливу сучасного пасажирського рухомого складу на напружено-деформований стан залізничної колії за результатами комплексу теоретичних і експериментальних досліджень.

- визначити технічні параметри конструкції колії та умови її експлуатації, за яких можливе виникнення динамічних процесів взаємодії, що виходять за межі застосування квазістатичних методів розрахунків.

- встановити узагальнені закономірності та залежності для врахування динамічного прогину підрейкової основи в сучасних моделях взаємодії залізничної колії з рухомим складом.

- розробити метод оцінки впливу швидкісного пасажирського руху в сучасних умовах на життєвий цикл експлуатації ділянки.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧИХ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

2.1 Гіпотези та методи сучасних розрахунків колії на міцність

Розрахунки колії на міцність виконують для вирішення таких **задач**, як визначення напружень і деформацій в елементах залізничної колії від впливу рухомого складу, обґрунтування конструкції та оцінка потужності колії щодо встановлених умов експлуатації, розрахунки допустимих швидкостей руху за умовами міцності колії, встановлення температурного режиму експлуатації безстикової колії тощо. Їх методика має довгу історію, яку можна відслідковувати починаючи ще з XIX століття, що докладно показано в роботах [20] і [101]. В розвиток цього напрямку досліджень внесли свій вклад багато відомих вітчизняних та закордонних вчених.

Як зазначено в [20], основа сучасних розрахунків колії на міцність була розроблена ще у 1954 р. [102] колективом авторів у складі М. Ф. Веріго, В. Н. Данилова, Є. М. Бромберга, С. Н. Попова, А. Х. Ветченко. Передумови аналітичних розрахунків рейки як балки на пружній основі були закладені в роботах проф. С. П. Тимошенка [228]. У 1986 р. вийшла праця проф. М. В. Веріго і проф. А. Я. Когана «Взаємодія колії і рухомого складу» [80], яка вважається фундаментальною з вирішення задач розрахунків колії на міцність, у тому числі з використанням просторових розрахункових схем.

В Україні вітчизняними вченими під керівництвом проф. Є. І. Даніленка були розроблені сучасні «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117 [22], які на сьогодні є діючим офіційним документом.

Розглянемо основні принципи та можливості моделювання роботи елементів залізничної колії для аналітичних розрахунків.

Рейка. В сучасних аналітичних розрахункових схемах рейка розглядається як балка, яка опирається на рівнопружну основу. В залежності від задачі, яка вирішується, і можливості спрощення розрахунків шляхом нехтування тих чи інших параметрів, можливі деякі варіації у представленні аналітичного рівняння. Опис подібних розрахункових схем розглянуто у великій кількості джерел. Як приклад розгорнутого представлення рівняння прогину рейки можна навести наступний [103]

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + EI \frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{d}{dz} \left(H \frac{dy}{dz} \right) + Uy + I_0 \frac{d^4 y}{dz^2 dt^2} = P(z, t), \quad (2.1)$$

де m – приведена маса рейки;

EI – жорсткість рейки на прогин;

H – поздовжня сила;

U – модуль пружності підрейкової основи;

I_0 – момент інерції одиниці довжини рейки відносно центральної вісі перпендикулярної до площини коливань;

$P(z, t)$ – розподілене вертикальне рухоме навантаження.

На перший погляд рівняння (2.1) досить повно описує напружено-деформований стан рейки, навіть з урахуванням фактору часу (t), коливань рейки у вертикальній площині (y) та їх зміною по довжині рейки (z). Але слід розглянути і проаналізувати кожен параметр, який використовується в моделі рейкової колії.

Приведена маса рейки (m). Мається на увазі та маса рейки, яка приймає участь у процесі взаємодії на даний момент часу при даному прогині рейки. Звісно, вона постійно змінюється, але представлення її у вигляді $m = f(t)$ або хоч би $m = f(z)$ унеможлиблює аналітичне розв'язання рівняння (2.1). В більшості задачах масою рейки (а найчастіше й інших елементів колії) просто нехтують [22, 104].

Поздовжня сила (H). Поздовжня сила може бути представлена у вигляді [105]

$$H = N + \int_{-\infty}^z W dz, \quad (2.2)$$

де N – поздовжня температурна сила;

W – розподілений пружний опір поздовжньому переміщенню рейки.

Враховуючи те, що поздовжня сила $H(z)$ змінюється дуже повільно у порівнянні з функцією $y(z, t)$ її можна прийняти постійною [103]. Для вирішення більшості задач роботи колії у вертикальній площині поздовжня сила не враховується. Насамперед її визначення необхідно для задач стійкості безстикової колії проти викиду, але їх вирішення потребує інших розрахункових схем, в яких розглядається рівновага рейко-шпальної решітки. Такі розрахункові схеми за методикою проф. С. П. Першина описано, наприклад, в роботах [106, 107].

Модуль пружності підрейкової основи U . Під модулем пружності в рівнянні (2.1) мається на увазі рівномірно розподілена жорсткість підрейкової основи. Від значення цього показника значно залежать результати розрахунків – і прогини, і напруження. Треба відокремлювати модуль пружності в точці під рейкою (якщо вважати, що рейка розташована на окремих опорах – саме його значення буде отримано, якщо статично навантажувати рейку й вимірювати прогин) та модуль пружності по довжині рейки (якщо вважати, що рейка розташована на безперервній пружній основі), а також відокремлювати статичний і динамічний модуль пружності. Для рівняння прогину рейки у вигляді (2.1) потрібен саме динамічний модуль пружності. При цьому доцільно враховувати, що він не є постійною величиною, а змінюється як від прогину рейки (причому нелінійно, тому потрібно говорити про його зміну в часі в процесі коливань рейки), так і по довжині: $U = f(t, z)$. Але у такому вигляді не тільки ускладнюються розрахунки, але й постає питання правильного завдання модуля пружності у вихідних даних.

На сьогодні існує декілька доволі різних засобів натурних вимірів модуля пружності підрейкової основи. Всі вони мають ти чи інші недоліки. Напевно, одним з перспективних можна вважати метод розрахунку модуля пружності за результатами експериментальних вимірів розподілу напружень по довжині рейки від руху поїзду [140], що дає змогу отримувати значення розподілене на деякій ділянці і визначене від динамічного навантаження.

Питання щодо правильного врахування і вимірювання модуля пружності перш за все пов'язані зі складністю фізичного процесу, що відбувається. На модуль пружності підрейкової основи впливають властивості елементів колії: підкладка, шпала, баласт, земляне полотно (звісно, для різних конструкцій колії цей список може мати відмінності). Його значення складається з жорсткості кожного з названих елементів, але не в рівній мірі, а з урахуванням їх вкладу у загальну деформацію на дану мить дії. Саме ступень їх вкладу буде суттєво залежати від динаміки процесу. Напевно, що чим меншу жорсткість має прошарок, тим більша частина прогину буде реалізовуватися саме за рахунок його деформації. Наприклад, в [109] висловлюється таке співвідношення деформацій шарів: рейка – 0,2%, прокладка – 34%, залізобетонна шпала – 0,8%, баласт – 22%, земляне полотно – 43%. Але деформації від навантаження на рейку поширюються не миттєво, і поки у процес увійде найменш жорсткий шар (земляне полотно) до взаємодії (теж поступово у часі) будуть вже залучені й інші елементи. Це спричинить зміну значення модуля пружності в часі в досить значних межах. А якщо навантаження діє дуже короткий час (достатньо велика швидкість руху поїзда), то значення модуля пружності може й не встигнути набути меж, які б відповідали стану урівноважених деформацій усіх шарів.

Жорсткість рейки на прогин (EI). Параметр, необхідний для розглядання рейки як балки без конкретних геометричних розмірів (вони зведені до моменту інерції).

Момент інерції одиниці довжини рейки відносно центральної вісі перпендикулярної до площини коливань (I_0). Як правило, інерцією обертання

нехтують, так як довжина балки (рейки) суттєво перевищує її поперечні розміри.

Зовнішнє навантаження ($P(z,t)$). Рівняння (2.1) дає змогу задавати зовнішнє навантаження у вигляді сили, як прикладеної в точці, так і рівномірно розподіленій по довжині рейки. Можна враховувати, що сила змінюється у часі по гармонічному закону, хоча це значно ускладнює математичний апарат для виконання розрахунків. Більшість задач вирішується для постійного значення сили, під яким мається на увазі максимально вірогідне навантаження, яке складається зі статистичної суми динамічно залежних складових [22, 104]. Але в будь-якому разі це повинна бути вертикальна сила, прикладена по осі балки (рейки). Врахування сумісної дії декількох сил (наприклад, одночасна дія на рейку декількох коліс) може бути отримано тільки попереднім приведенням їх до однієї.

Якщо для рівняння (2.1) прийняти низку спрощень: $m = 0$, $H = 0$, $I_0 = 0$ і, навіть, $P = 0$, отримаємо диференціальне рівняння прогину балки (рейки), яке використовується для сучасних розрахунків колії на міцність

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Uy = 0 ,$$

або у більш звичному вигляді

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + 4k^4 y = 0 , \quad (2.3)$$

де $k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}$ – коефіцієнт відносної жорсткості.

Рівняння (2.3) може бути отримано виходячи з математично можливої форми осі вигнутої балки, взагалі без розглядання динаміки процесу. Таким чином, воно дає загальний опис форми балки по довжині, яка була вигнута (не важливо яким чином, так як $P = 0$), і якій не дає випрямитися опір основи (причому не тільки вниз, а й вгору – ще одне припущення). Зв'язок між силою і прогином відновлюється при визначенні граничних умов для інтегрування рівняння (2.3). Виходячи з положень опору матеріалів

приймається, що поперечна сила в перерізі балки дорівнює половині зовнішньої зосередженої сили в місці її прикладення.

Рівняння (2.3) є базовим для «Правил розрахунку залізничної колії на міцність» [22].

Шпала. Вертикальні коливання шпали можуть бути описані диференціальним рівнянням близьким по структурі до рівняння (2.1) [103]

$$m_{ш} \frac{d^2 y_{ш}}{dt^2} + (C_{ск} + C_{ш}) y_{ш} = C_{ск} y_p, \quad (2.4)$$

де $m_{ш}$ – маса полушпали (умовно приймається, що кожна з двох рейок колії взаємодіє з половиною шпали);

$y_{ш}$ – пружна деформація шпали;

$C_{ск}$ – жорсткість вузла скріплення;

$C_{ш}$ – жорсткість шпали;

y_p – прогин рейки.

Напруження в шпалі під підкладкою визначаються за формулою

$$\sigma_{ш}(t) = \frac{Q_{ш}(t)}{F_n}, \quad (2.5)$$

де F_n – площа підкладки;

$Q_{ш}(t)$ – сила тиску колеса на полушпалу (крізь рейку)

$$Q_{ш}(t) = C_{ск} [y_p(t) - y_{ш}(t)], \quad (2.6)$$

Напруження на поверхні баласту під шпалою

$$\sigma_{\delta}(t) = \frac{Q_{\delta}(t)}{F_{ш} \alpha}, \quad (2.7)$$

де $F_{ш}$ – площа підошви полушпали;

α – коефіцієнт вигину шпали.

$Q_{\delta}(t)$ – сила, що діє від шпали на поверхню баласту

$$Q_{\delta}(t) = C_{ш} y_{ш}(t), \quad (2.8)$$

Проаналізуємо рівняння наведені для розрахунку деформовано-напруженого стану шпали.

Говорячи про напруження в шпалі під підкладкою і в баласті під шпалою (формули (2.7) і (2.8)), мають на увазі напруження, що діють по осі сили прикладеної до рейки (по осі рейки). Крім того вважається, що визначені таким чином напруження рівномірно розподілені по площі, на якій вони діють – по площі підкладки або по площі полушпали відповідно. Якщо прийняти до уваги відносно невелику площу підкладки, то таке припущення можна вважати прийнятним, але припущення про рівномірність напружень на поверхні баласту під всією площею полушпали суттєво відрізняє результат від дійсності. Частково це намагаються компенсувати через коефіцієнт вигину шпали α (враховує нерівномірність вигину шпали по довжині) і коефіцієнт m , який враховує нерівномірність напружень під подошвою шпали по її ширині (використовується для визначення напружень в товщі баласту) [22]:

$$\alpha = \frac{y_{\text{сер}}}{y_p}, \quad (2.9)$$

де $y_{\text{сер}}$ – середня пружна просадка шпали;

y_p – максимальна (розрахункова) пружна просадка шпали.

$$m = \frac{0,873}{\sigma_B + 0,427}. \quad (2.10)$$

Звісно, такі підходи не враховують динаміку процесу і не дають змогу визначати розподіл напружень по площі їх дії.

Для більшості розрахунків масою шпали (як і рейки) нехтують. В такому випадку залишки рівняння (2.4) визначають рівність між силами $Q_w(t)$ (формула (2.6)) і $Q_o(t)$ (формула (2.8)). Можна говорити, що це сила, яка діє від рейки на окрему опору (шпалу). Вона може бути визначена за формулою [22]

$$Q = U y_p l, \quad (2.11)$$

де l – відстань між осями шпал (опорами) – дає змогу перейти від схеми опирання рейки на суцільну рівнопружну основу з рівномірно

розподіленим модулем пружності, що використовується у рівнянні (2.1), до схеми опирання рейки на окремі рівнопружні опори з модулем пружності в точці.

З цього виходить, що шпала працює як абсолютно жорстке тіло – передає крізь себе силу від рейки на баласт не змінюючи її, тобто без пружної обробки, і рухається у вертикальній площині на величину, рівну прогину рейки. Також це приводить до нехтування на даному етапі розрахунку жорсткостями скріплення ($C_{ск}$) і шпали ($C_{ш}$), залишається вважати, що вони входять до загального модуля пружності підрейкової основи.

Баласт. До теперішнього часу в нормативних документах напружений стан баласту визначається статичною основою на лінійних деформаціях моделлю ґрунту по схемі Буссінеска-Цитовича, в якій напруження в точці не залежать від фізико-механичних параметрів, а визначаються тільки її положенням. А саме фізико-механічні характеристики баласту, його вага, в'язкість, пружність визначають динамічну жорсткість баласту, яка різна в залежності від частоти силової дії.

Такий підхід можна вважати одним з класичних методів вирішення задачі розрахунку напружень в однорідному ізотропному напівпросторі від статичного навантаження. Для рівномірно розподіленого навантаження напруження в залежності від місця їх визначення можна обчислити за відомою з загальної теорії пружності формулою

$$\sigma_i = \frac{p}{\pi} \left[\beta_1 + \frac{l}{2} \sin 2\beta_1 - (\pm \beta_2) - \frac{l}{2} \sin (\pm 2\beta_2) \right], \quad (2.12)$$

де p – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження;

β_1, β_2 – кути видимості показані на рис. 2.1; вони залежать від координат точки, в якій визначається напруження.

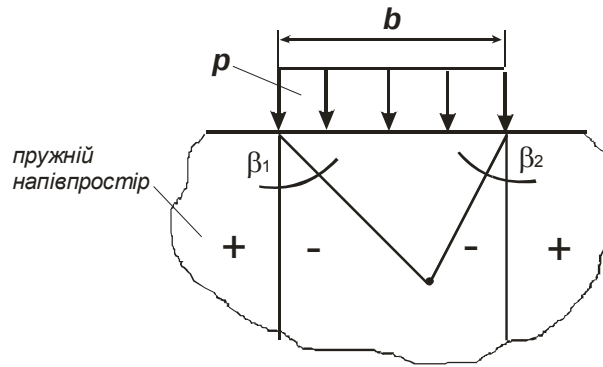


Рисунок 2.1 – Схема дії рівномірно розподіленого навантаження, яке прикладене на поверхні напівпростору

У «Практичних розрахунках залізничної колії на міцність» [22] для визначення напружень в товщі баласту використовується саме така методика, тільки напруження від шпали умовно розкладається на прямокутну і дві трикутні, а формула (2.12) має змінений вигляд за рахунок того, що напруження знаходяться тільки по осі дії сили і замість кутів, після представлення їх функцій у вигляді рядів Фур'є, використовуються коефіцієнти C_1 і C_2 , які залежать від товщини баласту

$$\sigma_h = \sigma_0 r_1 [0,635mC_1 + 1,275(2-m)C_2], \quad (2.13)$$

де σ_0 – напруження в баласті під шпалою, див. формулу (2.7);

m – коефіцієнт, що враховує зміну напружень по ширині шпали, див. формулу (2.10);

r_1 – емпіричний коефіцієнт, якій враховує малу величину товщини баласту у порівнянні з довжиною прикладання зовнішнього навантаження; його значення визначено для дерев'яної та залізобетонної шпали:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3}; \\ C_2 &= \frac{bh}{b^2 + 4h^2} \end{aligned} \right\}, \quad (2.14)$$

де b – довжина прикладання зовнішнього навантаження на баласт, у даному випадку – ширина підошви шпали;

h – товщина баласту, на якій розраховуються напруження.

Якщо тригонометричні залежності не спрощувати для інженерних розрахунків, коефіцієнти C_1 і C_2 мають визначатися так:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \beta; \\ C_2 &= 0.25 \sin 2\beta \end{aligned} \right\}, \quad (2.15)$$

$$\text{де } \operatorname{tg} \beta = \frac{2h}{b}.$$

Методика [22] також передбачає врахування напружень, які додаються від суміжних шпал відносно розрахункової.

Слід зазначити, що з точки зору теорії пружності результати розрахунків за формулою (2.12), а відповідно і за формулою (2.13), тим ближче до експериментальних даних, чим більша товщина шару, і взагалі унеможлиблює розрахунок, якщо ця товщина менше довжини зовнішнього навантаження. Якщо прийняти, що ширина нижньої постелі залізобетонної шпали 27,5 см, то маємо, що до цієї товщини баласту вказана методика не дає змоги визначити адекватні напруження, що, підтверджено результатами експериментальних досліджень.

Найчастіше така методика використовується лише для визначення напружень, що діють під товщею баласту на основну площадку земляного полотна для оцінки дії від рухомого складу за критеріями міцності колії і недостатня для вирішення більш складних задач. Наприклад, утворення виплесків, перш за все, пов'язана з процесом динаміки зволоженого забруднювача під дією поїзного навантаження, тому математична модель повинна включати можливість розрахунків кінематичних параметрів деформації баласту. Удосконалення системи утримання залізничної колії і, зокрема баластного шару, потребує розробки методики прогнозування накопичування залишкових деформацій засміченого та зволоженого баласту різноманітної міцності та різних умов експлуатації.

На сьогодні, з'являються пропозиції принципово інших моделей баласту, які базуються на розгляданні не суцільного тіла, а взаємодії множини окремих об'єктів (каменій щебеню). Але не зважаючи на уявну

наближеність до фізики процесу й такі моделі також не дали потрібних результатів, що пояснюється, в першу чергу, застосуванням складного математичного апарату з низкою припущень і неможливістю достатнього наближення вихідних даних до дійсного стану баласту.

Земляне полотно. Основні принципи розрахунку земляного полотна співпадають з методиками, наведеними для баласту. Можна зазначити, що земляне полотно краще відповідає теоретичним передумовам теорії пружності, як однорідний ізотропний напівпростір, у порівнянні з розглянутим баластом. Враховуючи значні вертикальні розміри, для більшості розрахунків в якості додаткового навантаження враховується власна вага ґрунту, що знаходиться над місцем, для якого виконується розрахунок.

2.2 Оцінка впливу факторів, що визначають сили взаємодії колеса і рейки

Одне з основних питань, що вирішується практичними розрахунками колії на міцність, – це визначення максимально імовірних напружень в елементах колії, що є показником її міцності. Тому зрозуміло, що основна увага надавалася «важким» вантажним одиницям рухомого складу, переважно локомотивам для вантажних поїздів. Але їх швидкість руху, як правило, не перевищує 80...90 км/год. Навіть з урахуванням пасажирського руху використання методики розрахунку за ЦП-0117 [22] обмежено швидкістю 160 км/год.

Сучасна тенденція розвитку транспортних мереж передбачає впровадження на залізницях України саме швидкісного та високошвидкісного руху пасажирських поїздів. Принципові конструкційні зміни у такому рухомому складі та суттєве зростання швидкості руху приводить до необхідності перегляду методик розрахунку їх дії на залізничну колію.

При конструюванні високошвидкісного рухомого складу знайшли застосування дві концепції тягового приводу: локомотивна (зосереджена тяга) – з тяговими двигунами, встановленими на електровозах, які у високошвидкісних поїздах, як правило, розміщуються по одному в головній і хвостовій частинах поїзда (виключення становлять, наприклад, високошвидкісні поїзди Х2000 (Швеція) і ICE2 (Німеччина), що мають по одному електровозу, або поїзд АРТ-Р (Великобританія), у якому два електровози розташовуються посередині рухомого складу), і моторвагонна (розподілена тяга) – з відносно рівномірним розміщенням тягових засобів уздовж поїзда.

На високошвидкісних лініях використовується рухомий склад з різними конструкціями обпирання кузовів на візки: зчленована, коли два суміжних вагони опираються на один візок, і незалежна, при якій кожний з вагонів підтримується двома індивідуальними візками. Суперництво конструкторів, що дотримуються однієї із двох концепцій, триває. Так, наприклад, міжнародний концерн Alstom випускає поїзди сімейства TGV тільки зі зчленованими вагонами, у той же час проміжні одноосьові візки використовуються в поїздах зі зчленованими вагонами Talgo.

Вважається, що зменшення жорсткості ресорного підвішування за інших рівних умов сприятливо позначається на плавності руху залізничних екіпажів. Тому існуючі тенденції, спрямовані на поліпшення плавності ходу, у першу чергу характеризуються зниженням жорсткості ресорного підвішування й відповідним збільшенням статичного прогину. Застосування гідравлічних приладів з комп'ютерним керування взагалі не вкладається в тотожний перехід до показників пружинно-механічних систем, закладених в існуючих розрахункових методиках.

Основним напрямком адаптації розрахунків колії на міцність для високих швидкостей руху треба вважати адекватність врахування динаміки процесу. Що стосується прогину рейки, то приймається, що він відбувається миттєво, а за обрис вигину рейки під впливом динамічного навантаження

приймається лінія вигину від статичного навантаження, чисельно рівного значенню динамічної сили в даний момент часу (гіпотеза Н. П. Петрова). Динамічне навантаження враховується через відповідне визначення розрахункової сили, в якості якої приймається максимальна вірогідна сила з імовірністю неперевищення 0,994 ($\lambda = 2,5$), що складається із статичного навантаження та комплексу динамічних добавок

$$P_{\text{розр}} = \bar{P} + \lambda S, \quad (2.16)$$

де $\bar{P}$ – середнє значення сили, що діє від колеса на рейку;

S – середньоквадратичне відхилення сили, що діє від колеса на рейку.

В практичних розрахунках колії на міцність [22, 104] показники сили, що діє від колеса на рейку визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= P_{\text{ст}} + \bar{P}_p; \\ S &= \sqrt{S_p^2 + S_{\text{рн}}^2 + 0,05S_{\text{інк}}^2 + 0,95S_{\text{бнк}}^2} \end{aligned} \right\}, \quad (2.17)$$

де $P_{\text{ст}}$ – вага екіпажу, віднесена до одного колеса (статичне навантаження);

$\bar{P}_p$ – середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажу;

S_p – середньоквадратичне відхилення сили від коливань надресорної ваги екіпажу;

$S_{\text{рн}}$ – середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю;

$S_{\text{інк}}$ – середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі ізолюваної нерівності;

$S_{\text{бнк}}$ – середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі безперервної нерівності.

Максимальне значення сили від коливань надресорної ваги екіпажу (кузова) можна визначити деякими засобами: через максимальний прогин ресор, через статичний прогин ресор або через коефіцієнт вертикальної динаміки

$$P_{\text{р(max)}} = k_d (P_{\text{ст}} - q_k), \quad (2.18)$$

де k_d – коефіцієнт вертикальної динаміки;

q_k – вага необресореної частини екіпажа, віднесена до одного колеса, кН.

Середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажу приймається як 75% від її максимального значення, а середньоквадратичне відхилення – 8%

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_p &= 0,75P_{p(\max)} \\ S_p &= 0,08P_{p(\max)} \end{aligned} \right\}, \quad (2.19)$$

Середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю визначається за формулою

$$S_{pn} = 1,81 \cdot 10^{-7} \alpha_1 \beta \varepsilon \gamma l \sqrt{\frac{U q_k}{k}} \bar{P} V, \quad (2.20)$$

де α_1 – коефіцієнт, що залежить від типу шпал (враховує вагу верхньої будови колії, що приймає участь у взаємодії з колесом);

β – коефіцієнт, що враховує тип рейок (залежить від моменту інерції рейки);

ε – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;

γ – коефіцієнт, що залежить від виду баласту;

l – відстань між осями шпал, см;

U – модуль пружності підрейкової основи, МПа;

k – коефіцієнт відносної жорсткості, см^{-1} ;

V – швидкість руху, км/год.

Середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі ізолюваної нерівності визначається за формулою

$$S_{инк} = 0,05 \alpha_0 \xi e_0 \frac{U}{k}, \quad (2.21)$$

де α_0 – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;

ξ – безрозмірний прогин (відношення додаткового прогину рейки, що виникає внаслідок наявності на колесі ізолюваної нерівності, до глибини цієї нерівності);

e_0 – глибина ізольованої нерівності на колесі, см.

Середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі безперервної нерівності визначається за формулою

$$S_{\text{бнк}} = \frac{1,63 \cdot 10^{-2} \alpha_0 U \sqrt{q_k} V^2}{d^2 \sqrt{kU - 32k^2 q_k}}, \quad (2.22)$$

де d – діаметр колеса, см.

Як видно з наведених формул, динамічні складові сили, що діє від колеса на рейку, мають складні залежності від багатьох параметрів. Проведені дослідження показали, що для більшості різновидів сучасних одиниць швидкісного та високошвидкісного рухомого складу, має місце характерна залежність внеску кожної динамічної добавки у загальне значення сили. Визначальними вихідними даними можна вважати швидкість руху і модуль пружності підрейкової основи. На рис. 2.2 наведено приклад зміни значень середньоквадратичних відхилень чотирьох динамічних сил, що входять до практичних розрахунків на міцність, в залежності від швидкості руху для модуля пружності підрейкової основи 50 МПа.

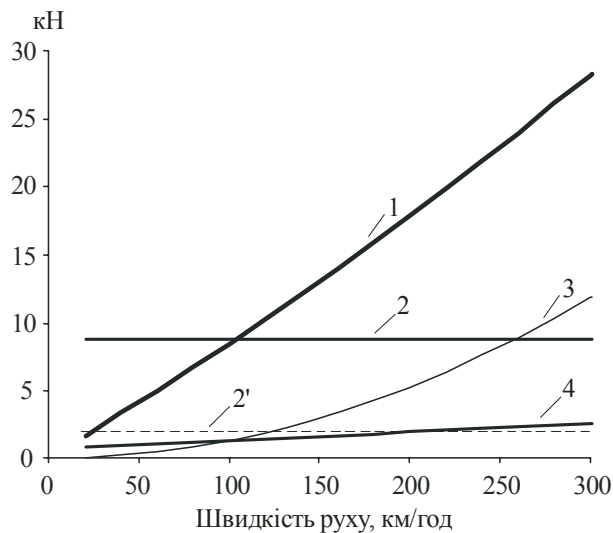


Рис. 2.2. Зміна середньоквадратичних відхилень динамічних сил від швидкості руху: 1 – $S_{\text{рн}}$; 2 – $S_{\text{інк}}$; 2' – $S_{\text{інк}}$ з урахуванням припущення про 5% таких коліс;

$$3 – S_{\text{бнк}}; 4 – S_{\text{р}}$$

З проведеного аналізу, приклад якого можна дослідити на рис. 2.2, видно, що співвідношення середньоквадратичних відхилень різних

динамічних сил, а відповідно й вплив різних факторів, для різних швидкостей руху не однаковий. Так можна відокремити зону з швидкостями руху до 80...100 км/год (особливо важливо для вантажних поїздів і детально досліджено в діючих розрахунках колії на міцність), та зони зі швидкістю руху 120...250 км/год і більше 250 км/год.

На рис. 2.3 показана залежність складових розрахункової сили (загального середньоквадратичного відхилення і середнього значення сили від коливань надресорної ваги екіпажу) в залежності від швидкості руху. З рисунку видно, що при швидкостях руху до 40...60 км/год середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажу не поступає за рівнем двом з половиною середньоквадратичним відхиленням, а, відповідно, має суттєвий вплив на остаточне значення розрахункової сили. З ростом швидкості руху цей вплив швидко зменшується.

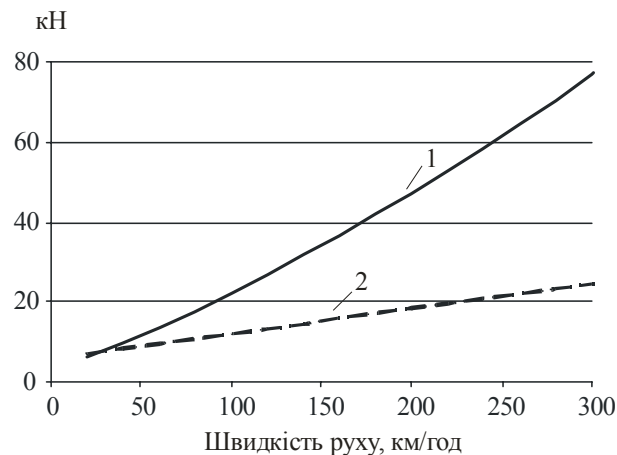


Рисунок 2.3 – Зміна складових розрахункової сили в залежності від швидкості руху: 1 – $2,5S$; 2 – $\bar{P}_p$

Таким чином, можна прийти висновку, що коливання кузова в сучасних пасажирських вагонах якісно гасяться і не приводять до суттєвого збільшення вертикальної сили тиску колеса на рейку. Основним фактором збурення динамічної сили можна вважати проходження колесом динамічної нерівності колії, яка утворюється навіть за відсутністю суттєвих геометричних нерівностей внаслідок коливань рейки на пружній підрейковій основі. Аналогічні висновки отримані в роботах [110, 111], в тому числі за

результатами статистичної обробки експериментальних даних випробувань пасажирських поїздів.

Тому доцільно переглянути методику визначення саме динамічної сили від проходження колеса по рейковій нерівності. В первинному вигляді формулу (2. 20) можна представити наступним чином [104]

$$S_{\text{рн}} = 0,707\alpha_0 \frac{\pi^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{Uq_k}{k}} Vi, \quad (2.23)$$

де 0,707 – коефіцієнт переходу від максимального значення сили до її середньоквадратичного відхилення, що відповідає тригонометричній функції, яка закладається для опису гармонічних коливань;

g – прискорення вільного падіння;

i – динамічний ухил рейкової нерівності;

α_0 – коефіцієнт, який увійшов у формулу згодом, визначається відношенням маси колеса і маси колії, приведених до точки їх контакту.

Формула (2.23) є результатом обробки даних рішення диференційного рівняння коливань механічної пари «колесо-рейка», первинно отримана для підрейкової основи з дерев'яними шпалами [20, 104, 112]. Для залізобетонних шпал було запропоновано іншу формулу [104, 113]

$$S_{\text{рн}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} \bar{P} V \sqrt{q_k}}{\sqrt[8]{EIU^3}}. \quad (2.24)$$

В сучасних практичних розрахунках колії на міцність [22] використовується формула (2.20), отримана з формули (2.23) з відповідними коефіцієнтами, які враховують насамперед зміну параметрів динамічної нерівності при застосуванні залізобетонних шпал, викликану збільшенням жорсткості підрейкової основи та зміною приведеної маси колії

$$\left. \begin{aligned} i &= A\alpha_1\beta\epsilon\gamma l\bar{P} \\ A &= \frac{1,788 \cdot 10^{-4} \sqrt{2g}}{\pi^2 \alpha_0} \end{aligned} \right\}, \quad (2.25)$$

На рис. 2.4 показано приклад залежностей середньоквадратичного відхилення сили від проходження по рейковій нерівності від модуля

пружності підрейкової основи, розрахованих за формулами (2.20) і (2.24), для декількох рівнів швидкостей руху: 40, 160 і 250 км/год. При низьких швидкостях руху розбіжність в розрахунках незначна. Для модуля пружності підрейкової основи близько 50 МПа результати збігаються. Суттєве збільшення модуля пружності приводить до розходження результатів, яке стає особливо відчутним при високих швидкостях руху. Причому за формулою (2.20) збільшення модуля пружності збільшує силу: більш жорстка колія – більш важка, особливо у порівнянні дерево – залізобетон, а значить – більша приведена маса колії. За формулою (2.24) збільшення модуля пружності зменшує силу: більш жорстка колія тієї самої конструкції (залізобетон, літній і зимовий періоди) має меншу довжину і глибину прогину, а значить – менша приведена маса колії.

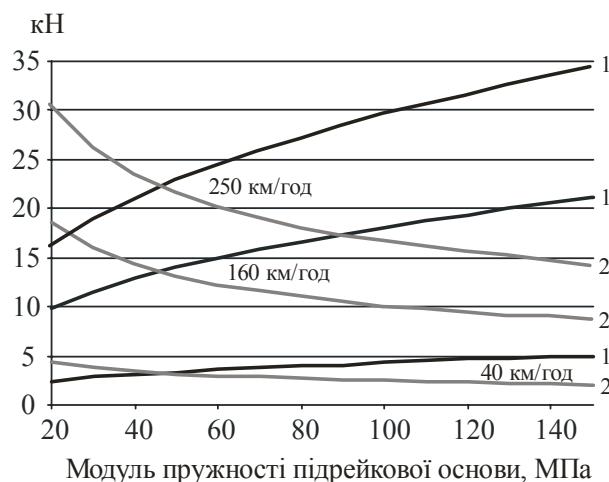


Рисунок 2.4 – Залежність середньоквадратичного відхилення сили від проходження колеса по рейкової нерівності відносно модуля пружності підрейкової основи: 1 – за формулою (2.20); 2 – за формулою (2.24)

В даному дослідженні не передбачається вирішувати задачу визначення приведеної маси колії. Навпаки, наведений аналіз показує, що такий параметр є штучним і може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку [68, 114].

2.3 Визначення навантаження для розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії

2.3.1 Імовірнісний підхід з використанням статистичної сукупності динамічних додатків

Імовірнісний підхід з використанням статистичної сукупності динамічних додатків є базовим для визначення розрахункової сили, що діє від колеса на рейку при виконанні «Розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» [22].

В основу розрахунку покладена гіпотеза, що сила, діюча від колеса на рейку, має імовірнісний характер і підпорядкована закону розподілення Гауса. Приклад зображення відповідної кривої розподілення наведений в роботі [104], рис. 2.5. Результат відноситься до величин напружень в рейках, що спостерігалися від однакового колісного навантаження при однаковій швидкості руху.

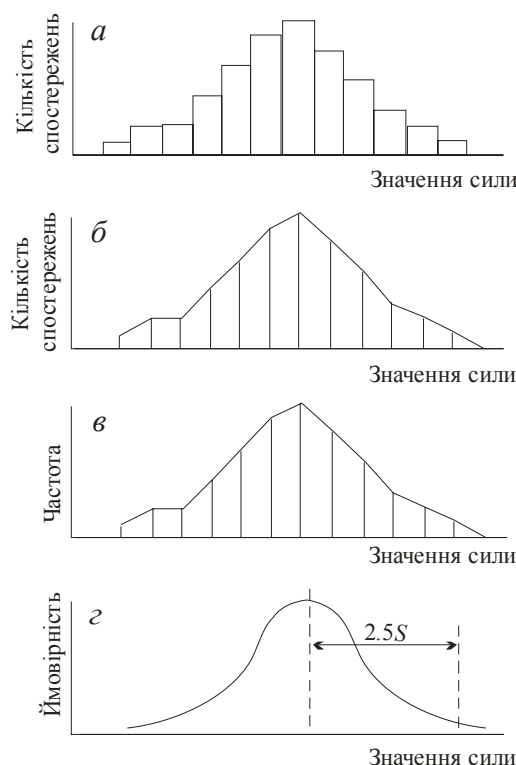


Рисунок 2.5 – Вірогідність розподілення напружень в рейці [104]: *a* – гістограма розподілення; *б* – багатокутник розподілення; *в* – полігон частот; *г* – крива розподілення Гауса

Найчастіше має місце середнє значення сили, що діє від колеса на рейку, але можуть виникати як більші, так і менші значення. Приймається, що розрахункова сила визначається за формулою (2.16). Коефіцієнт вірогідності, приймається $\lambda=2,5$, що відповідає вірогідності неперевикнення розрахункової сили 0,994;

Таким чином, розглянутий підхід дає змогу визначити значення розрахункової сили з урахуванням швидкості руху і деяких основних параметрів, пов'язаних з конструкцією і станом залізничної колії та рухомого складу.

2.3.2 Визначення динамічної сили через статичне навантаження

Визначення динамічної сили через статичне навантаження застосовується в більшості європейських країн. Динамічне навантаження визначається як перехід від статичного [109, 115]

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ст}} + t \cdot \bar{s} \cdot P_{\text{ст}}, \quad (2.26)$$

$$\bar{s} = n \cdot \varphi, \quad (2.27)$$

де t – коефіцієнт розподілення, при $t=3$ приймається, що точність розрахунків складає 99.7%;

n – коефіцієнт, що враховує стан ділянки, приймається в межах 0.1...0.3;

φ – фактор швидкості руху:

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140}, \quad (2.28)$$

V – швидкість руху, км/год.

Для швидкостей до 60 км/год включно фактор швидкості приймається $\varphi=1$.

В роботі [109] при розрахунку фактора швидкості пропонується враховувати тип поїзда:

– для вантажних поїздів

$$\varphi = 1 + 0,5 \frac{V - 60}{80}; \quad (2.28a)$$

– для пасажирських поїздів

$$\varphi = 1 + 0,5 \frac{V - 60}{190}. \quad (2.28б)$$

На рис. 2.6 наведена розрахункова схема для визначення напружень в елементах залізничної колії, яка використовується в деяких європейських країнах [115]. На схемі показані розрахункові значення площ для визначення напружень і допустимі рівні відповідних напружень.

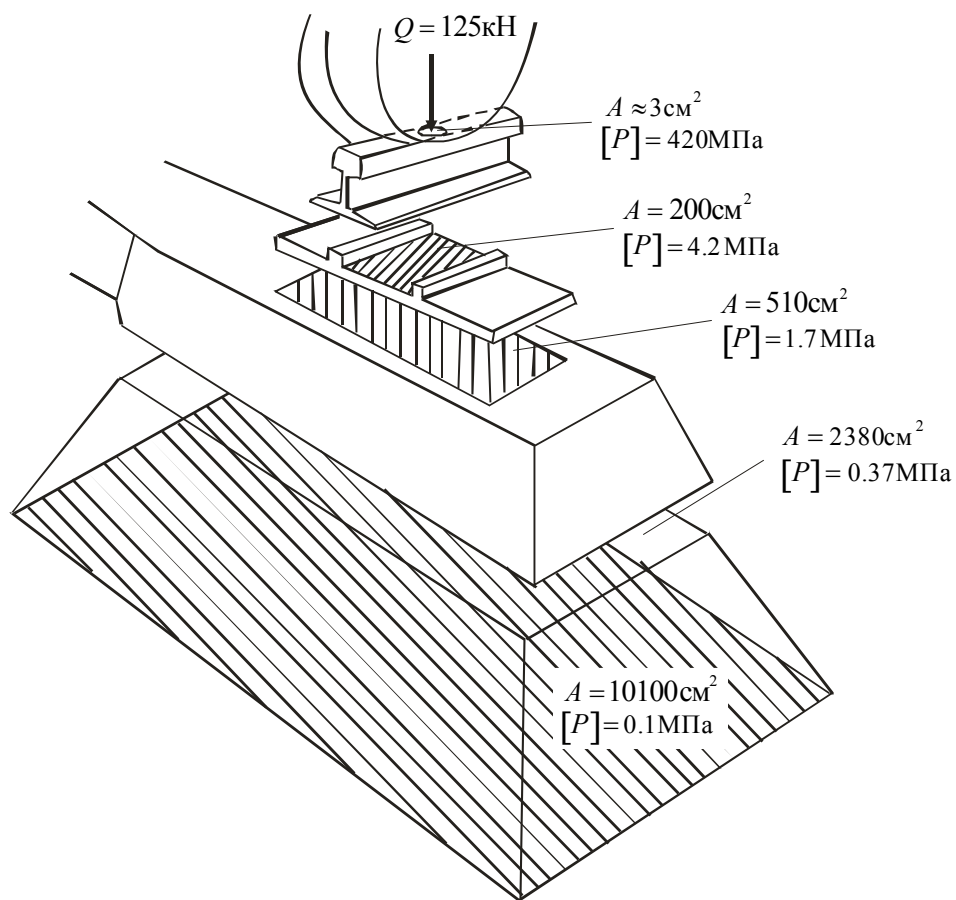


Рисунок 2.6 – Приклад розрахункової схеми для визначення напружень в елементах колії, прийнята в Угорщині [115]

2.3.3 Врахування дії суміжних коліс

Колеса, розташовані поруч з розрахунковим, особливо в межах візка, можуть впливати на рівень навантаження на колію. Відповідно до [22] такий вплив має бути врахований.

Методика «Розрахунку залізничної колії на міцність і стійкість» [22] рекомендує від розрахункової сили переходити до еквівалентної. Дія від такої однієї сили повинна бути еквівалентна навантаженню від сполучення декількох коліс. Враховуючи те, що залежність напружень від відстані до точки прикладення сили для рейки і для підрейкової основи різна, визначаються дві еквівалентні сили. Перша еквівалентна сила ($P_{\text{екв}}^I$) використовується для визначення згинального моменту і напружень в рейці, друга ($P_{\text{екв}}^{II}$) – для визначення прогину рейки і напружень в елементах підрейкової основи (в шпалах, баласті, земляному полотні):

$$P_{\text{екв}}^I = P_{\text{екв}} + \sum \bar{P} \mu_i, \quad (2.29)$$

$$P_{\text{екв}}^{II} = P_{\text{екв}} + \sum \bar{P} \eta_i, \quad (2.30)$$

$$\mu_i = e^{-kx_i} (\cos kx_i - \sin kx_i), \quad (2.31)$$

$$\eta_i = e^{-kx_i} (\cos kx_i + \sin kx_i), \quad (2.32)$$

Формули (2.29) і (2.30) представлені у вигляді, який відповідає гіпотезі, що розрахункове колесо (яке співпадає з розрахунковим перерізом колії) передає розрахункове (динамічне) значення сили, а всі інші колеса – середнє значення. Приклад для варіанта, коли розрахунковим є середнє колесо трьохвісного візка, показано на рис. 2.7 [20].

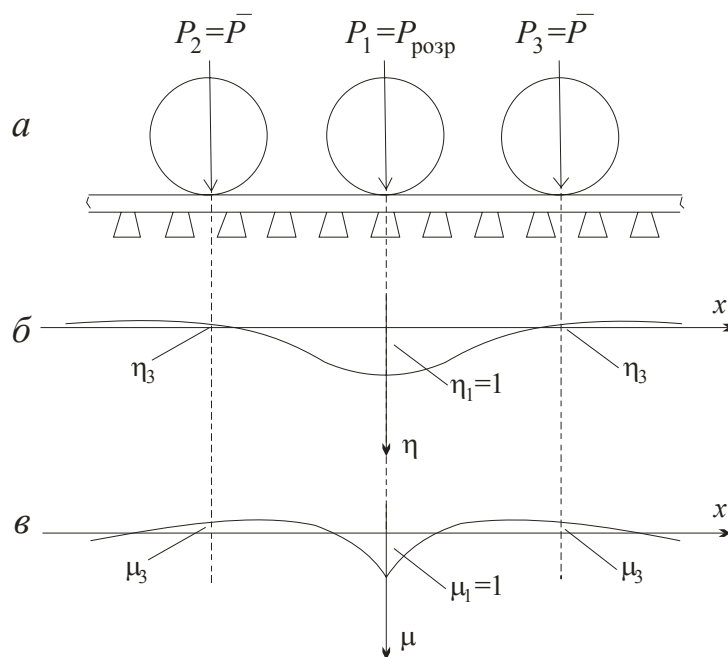


Рисунок 2.7 – Навантаження від трьохвісного візка [20]: *а* – схема трьохвісного візка; *б* – лінія впливу коефіцієнта $\eta(x)$; *в* – лінія впливу коефіцієнта $\mu(x)$

В більшості випадків в сучасних пасажирських та вантажних вагонах використовують двохвісні візки, в локомотивах двох або трьохвісні. В деяких методиках визначення сили, що діє від рухомого складу на колію, врахування впливу другого (третього) колеса у візку є обов'язковим, в деяких цим нехтують.

Аналіз такого впливу було здійснено на основі формул (2.29...2.30). Результат насамперед залежить від двох факторів: відстань від розрахункового перетину колії до колеса і модуль пружності підрейкової основи. Особлива увага була надана наступним групам рухомого складу: вантажні вагони на візках ЦНИИ-ХЗ-0 – відстань між осями коліс 185 см; локомотиви з відстанню між осями коліс 210 см (такі як 2ТЭ10, М62 та інші); пасажирські вагони на візках КВЗ-ЦНИИ – відстань між осями коліс 240 см. Як правило, локомотиви з невеликими відстанями між колесами мають трьохвісні візки, в такому разі для перерізу колії під середньою віссю додаткове навантаження від крайніх коліс буде подвоюватись.

Усереднені значення впливу від колеса на колію в залежності від відстані наведено на рис. 2.8. Як можна бачити, тиск на рейку (відповідно згинаючий момент в перерізі рейки і напруження в рейці) на віддаленні від розрахункового перерізу швидко зменшується і навіть переходить в зону розвантаження. Таким чином, при вирішенні задач розрахунку напружень в рейці, впливом від суміжного колеса можна нехтувати. Однак, тиск на підрейкову основу (відповідно прогин рейки, напруження в шпалі, баласті, земляному полотну) може збільшуватись більше 5% для вантажних вагонів та локомотивів з невеликою базою візка (для останніх результати наведені на рис. 2.8 можуть бути ще збільшені вдвічі, якщо має місце трьохвісний візок). Для ділянок з низьким модулем пружності підрейкової основи збільшення тиску на підрейкову основу може бути суттєвим, наприклад, до 15% при модулі пружності 20 МПа.

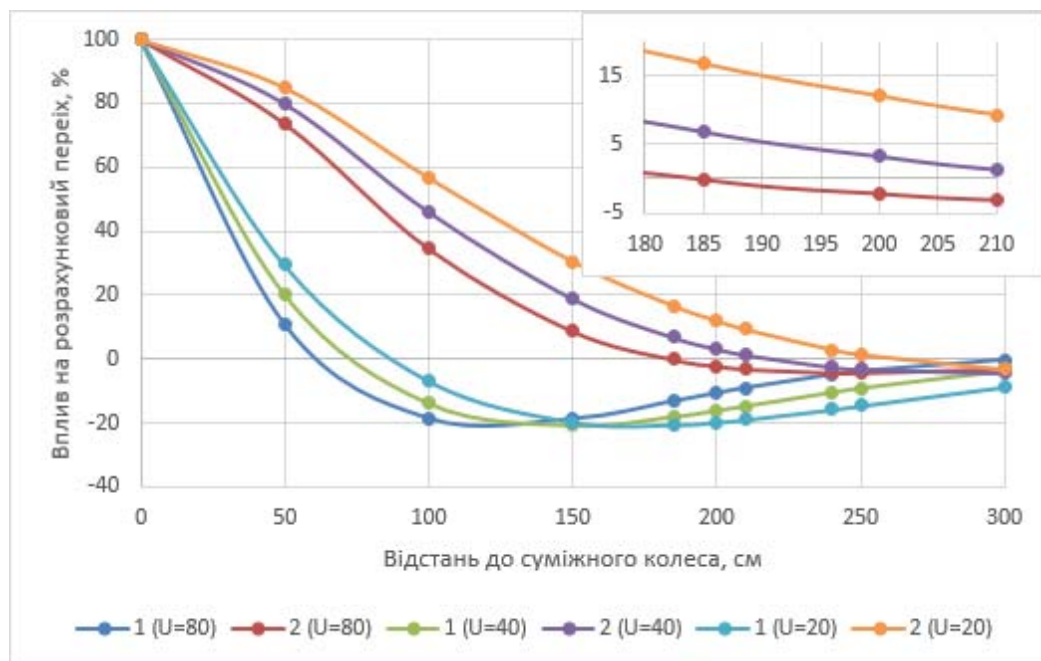


Рисунок 2.8 – Вплив від колеса на колію в залежності від відстані для модуля пружності підрейкової основи 20, 40 і 80 МПа:

1 – тиск на рейку; 2 – тиск на підрейкову основу

При визначенні динамічної сили для розрахунків напружень та деформацій в елементах підрейкової основи від вантажних вагонів або

локомотивів з відстанню між осями менше 230 см, особливо для колії з модулем пружності підрейкової основи до 50 МПа, пропонується враховувати додатковий тиск від суміжних коліс. В інших випадках вплив суміжного колеса не суттєвий.

2.4 Удосконалення розрахунків колії на міцність для нерівнопружної підрейкової основи

2.4.1 Загальні положення

Модуль пружності підрейкової основи є однією з основних характеристик для оцінки напружено-деформаційного стану залізничної колії, як було показано в аналізі аналітичних методів розрахунку (див. п. 2.1). Він визначає зв'язок між діючою силою і деформацією – одне з положень, на якому базується сучасний метод інженерного розрахунку колії на міцність.

Питання з адекватного врахування і вимірювання модуля пружності перш за все пов'язані зі складністю фізичного процесу, що відбувається. На модуль пружності підрейкової основи впливають властивості всіх елементів колії: шпали, підкладки, баласту, земляного полотна тощо.

Нерівнопружність підрейкової основи може виникати у різних випадках. Це може бути наслідок порушень стану залізничної колії – наявність просядок, непридатних скріплень, забруднення баласту тощо [109]. Найбільш чутними до розвинення місць нерівнопружності є ділянки з інтенсивним рухом [116] або з обпиранням на слабкі ґрунти [77].

Існує методика розрахунку дійсного модуля пружності ділянки колії на основі натурного вимірювання напружень в рейках від поїзного навантаження, яка представляє собою вирішення зворотної задачі інженерного розрахунку колії на міцність. Досвід застосування такої методики у роботах Колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії ДНУЗТ показав наявність випадків, коли неможливо отримати

адекватні результати. Це мало місце на ділянках з суттєвим порушенням стану колії, наприклад за наявністю просадки третього ступеня [140].

З іншого боку, нерівнопружність може бути обумовлена самою конструкцією залізничної колії – це місця перед мостами та шляхопроводами. У цьому випадку може спостерігатися як різка зміна модуля пружності при безпосередньому примиканні звичайної конструкції колії до безбаластної, так і більш-менш поступова за рахунок застосування перехідних ділянок, розробка ефективних конструкцій яких триває до сьогоденішнього часу [110, 111].

Питання необхідності в різних випадках враховувати нерівнопружність підрейкової основи вже розглядалася в роботах різних авторів, наприклад, [111, 112, 113, 68, 114]. При цьому було застосовано різні математичні методи: розвиток моделі колії, як балки на дискретних опорах [112, 113]; модель в'язко-пружних стержнів [68, 114] тощо. Було отримано адекватні рішення в рамках поставлених задач. Однак, результати містять доволі складні математичні підходи і не вкладаються в межі стандартного інженерного розрахунку колії на міцність [22]. Тому метою даною роботи є отримання рішення в рамках припущень та наробіток зазначеного документу.

Квінтесенція методики інженерного розрахунку на міцність – диференційне рівняння прогину рейки – визначено саме для рівнопружної основи. Тому використання математичних співвідношень, отриманих на його ґрунті, неможливе для випадків, коли модуль пружності різний в межах довжини прогину рейки. Безпосереднє введення модуля пружності як функції від шляху у рівняння прогину рейки унеможливило отримання аналітичних рішень.

Пропонується у якості моделі розглядати рейку як балку, яка має суцільне навантаження з таким обрисом, відповідним до значення модуля пружності, що дає еквівалентний прогин при вільному обпиранні на дві опори. У цьому випадку нерівномірність модуля пружності враховується

відповідною зміною обрису навантаження і, з деякими припущеннями, дає змогу отримати корективи для загальновідомих залежностей.

Діюча на сьогоднішню методика практичного розрахунку колії на міцність, яка використовується для вирішення низькі задач взаємодії колії і рухомого складу, викладено в інструкції ЦП-0117 [22]. В якості основної моделі для розрахунку колії на міцність прийнято балку нескінченної довжини, яка опирається на рівнопружну основу і сприймає навантаження від поодинокі вертикальної сили, рис. 2.9.

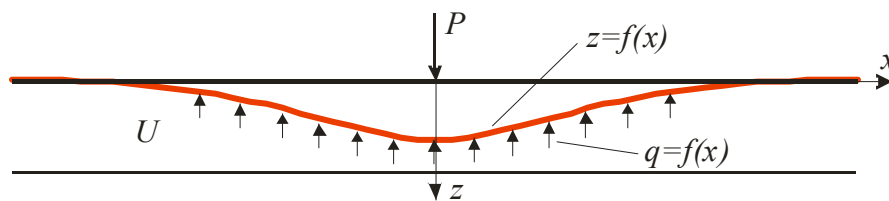


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема прогину балки на рівнопружній основі

Тоді деформований стан балки буде описуватися загальновідомим диференціальним рівнянням

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + Uz = 0, \quad (2.33)$$

де EI – жорсткість балки (рейки) на прогин;

z – вертикальний прогин рейки;

x – відстань по рейці від точки прикладання сили;

U – модуль пружності підрейкової основи.

Одним з базових припущень такого підходу є пряма залежність між реактивним опором основи (q) і прогином рейки

$$q(x) = Uz(x). \quad (2.34)$$

Якщо

$$U = const, \quad (2.35)$$

розв'язання рівняння (2.33) з урахуванням певних граничних умов відомо

$$z(x) = \frac{Pk}{2U} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (2.36)$$

де P – вертикальна сила, діюча на рейку;

k – коефіцієнт відносної жорсткості

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}. \quad (2.37)$$

Безпосереднє введення модуля пружності як функції від шляху $U = f(x)$ у рівняння прогину рейки (2.33) унеможливило отримання аналітичних рішень для застосування у інженерних розрахунках. Формули, які отримані на основі рівняння (2.33) і його рішення (2.36) для розрахунку згинаючого моменту в перерізі рейки, поперечної сили тощо і, як наслідок, напружень в елементах залізничної колії [22], не можуть бути використані для окремого перерізу з відомим модулем пружності підрейкової основи. Для їх адекватності умова (2.35) повинна виконуватися хоча б на довжині відчутного прогину рейки

$$\forall x \in \{z(x) \neq 0\} | U(x) = \text{const}. \quad (2.38)$$

В залежності від величини модуля пружності підрейкової основи довжина прогину рейки може складати декілька метрів.

2.4.2 Врахування локальної нерівнопружності

Для вирішення задачі у випадках невиконання умови (2.38), пропонується розглянути альтернативну розрахункову схему: рейка приймається як балка, що вільно опирається на дві опори і прогинається від розподіленого навантаження $q = f(x)$, рис. 2.10. При відповідному обрисі навантаження і відстані між опорами, такий підхід дає результат тотожний попередньо розглянутому.

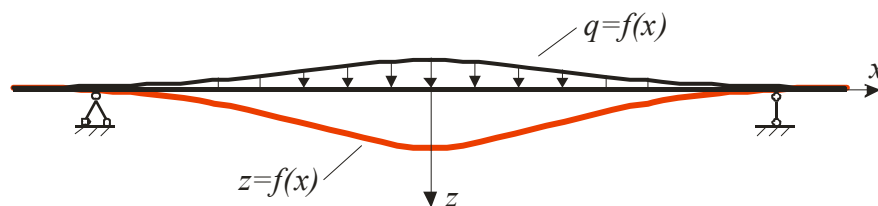


Рисунок 2.10 – Розрахункова схема прогину балки при обпиранні на опори

При виконанні умови (2.38) для тотожності розрахункових схем обрис навантаження визнається з рівняння (2.33) по загальновідомим диференційним співвідношенням характеристик прогину балки

$$q(x) = \frac{Pk}{2} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx). \quad (2.39)$$

Таким чином, для отримання розрахункової схеми, яка буде відповідати змінному модулю пружності підрейкової основи $U = f(x)$, достатньо задати відповідний обрис навантаження $q = f(x)$.

Розглянемо випадок, коли модуль пружності змінюється лінійно. На рис. 2.11 показано обрис зміни навантаження по довжині рейки для двох випадків: 1 – для постійного значення модуля пружності підрейкової основи U_1 , що відповідає рівнянню (2.39); 2 – для лінійного збільшення модуля пружності від U_1 у точці прикладення сили до U_2 у точці під умовною опорою.

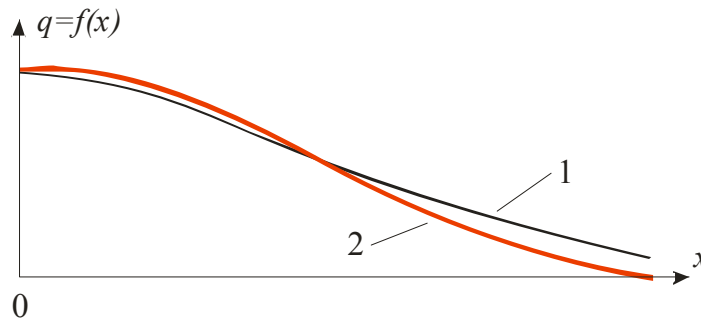


Рисунок 2.11 – Обрис розподілення навантаження по довжині рейки: 1 – для постійного значення модуля пружності (U_1); 2 – для лінійного збільшення модуля пружності (від U_1 до U_2)

Для виконання подальших розрахунків доцільно представити навантаження, як дві складові: q_1 і q_2

$$\left. \begin{aligned} q &= q_1 + q_2; \\ q_1 &= f(x): U = U_1; \\ q_2 &= f(x): U = U_1 \dots U_2 / q_1 \end{aligned} \right\}. \quad (2.40)$$

Тоді обрис навантаження q_1 відповідає лінії «1» на рис. 2.11, а обрис навантаження q_2 наведено на рис. 2.12.

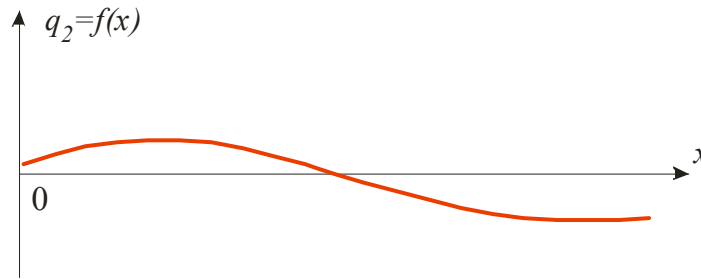


Рисунок 2.12 – Обрис додаткового навантаження (q_2) по довжині рейки

Як показали дослідження, у межах ділянки прогину функцію $q_2 = f(x)$ зручно апроксимувати поліномом виду

$$q_2 \left(x \in \left[0 \dots \frac{3\pi}{4k} \right] \right) = ax'^3 + bx'^2 + cx', \quad (2.41)$$

де $x' \approx \frac{3\pi}{4k} - x$; $k = f(U_1)$.

Виходячи з загальновідомих співвідношень характеристик прогину балки можна визначити згинальний момент

$$M(x) = \iint q_1 dx dx + \iint q_2 dx dx. \quad (2.42)$$

Перша складова формули (2.42) визначається з рівняння (2.39), а друга – з рівняння (2.41)

$$M \left(x \in \left[0 \dots \frac{3\pi}{4k} \right] \right) = \frac{P}{4k} e^{-kx} (\cos kx - \sin kx) + \frac{Pk}{4} \left(\frac{ax'^5}{10} + \frac{bx'^4}{6} + \frac{cx'^3}{3} \right). \quad (2.43)$$

Графік зміни згинального моменту по довжині рейки показано на рис. 2.13 для постійного модуля пружності підрейкової основи (U_1) і за розрахунками по формулі (2.43) для умов збільшення модуля пружності від U_1 до U_2 .

Як видно з рис. 2.13, в місці меншого модуля пружності підрейкової основи відбувається збільшення згинального моменту за рахунок

перерозподілу прогину рейки з зони більш жорсткого обпирання до зони більш піддатливого.

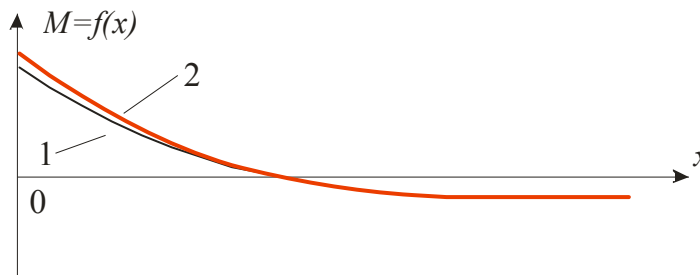


Рисунок 2.13 – Зміна згинального моменту по довжині рейки: 1 – для постійного значення модуля пружності (U_1); 2 – для лінійного збільшення модуля пружності (від U_1 до U_2)

Напевно, для корекції саме інженерного розрахунку достатньо обійтися коефіцієнтом k_M , який буде враховувати збільшення згинального моменту (а відповідно і максимально вірогідних згинальних напружень в рейці) для перерізу збігу сили з найменшим модулем підрейкової основи

$$M_{U_1 \dots U_2}^{\max} = (1 + k_M) M_{U_1}^{\max}. \quad (2.44)$$

Значення коефіцієнту k_M (формула (2.44)), визначеного за вищенаведеною методикою, для різних варіантів зміни модуля пружності показано у табл. 2.1.

Так, наприклад, при зміні модуля пружності від 20 МПа в точці прикладання сили (розташування колеса) до 50 МПа на кінці зони прогину, значення згинального моменту зростає на 13% (це навіть у порівнянні з розрахунком для рівнопружної основи з меншим значенням модуля пружності. Така зміна модуля пружності може відповідати місцю на колії з суттєвою просадкою. В такому разі зростання модуля пружності напевно буде відбуватися в обидві сторони, і тоді значення коефіцієнту k_M повинно

бути подвоєно і збільшення згинального моменту буде складати вже 26%.
Тоді формула (2.44) прийме наступний вигляд

$$M_{U_1 \dots U_2}^{\max} = (1 + 2k_M) M_{U_1}^{\max}. \quad (2.45)$$

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнту k_M в залежності від зміни модуля пружності підрейкової основи

U_1 , МПа	U_2 , МПа			
	30	40	50	60
20	0,077	0,115	0,130	0,131
30		0,044	0,063	0,067
40			0,022	0,029
50				0,008

Якщо модуль пружності підрейкової основи в перерізі під силою достатньо великий (50 МПа та більше), подальше його збільшення по довжині рейки (в реальних межах) не приводить до відчутного перерозподілу прогину рейки.

Якщо значення модуля пружності по краям зони прогину рейки достатньо велике (60 МПа та більше), наявність під силою «м'якого» місця вже не приводить до подальшого збільшення згинального моменту, що пояснюється неможливістю рейки при таких умовах прогнутися у відповідності до рівняння (2.33) і при цьому забезпечити виконання умови (2.34).

Перехід в межах прогину рейки з більшого модуля пружності на менший не розглядається – в такому випадку в перерізі під силою не буде спостерігатися зростання згинального моменту і відповідно згинальних напружень в рейці.

2.4.3 Сполучення колії на баласті з колією на безбаластній мостовій споруді

Розглянемо інший випадок нерівнопружності підрейкової основи. При примиканні звичайної конструкції колії до безбаластної (підхід до мосту) спостерігається дуже різка зміна модуля пружності підрейкової основи. Такий перехід не може бути описано за наведеною вище методикою. Враховуючи значно більшу жорсткість колії на мосту, можна прийняти відсутність прогину підрейкової основи. В такому разі, в якості розрахункової пропонується використовувати схему приведену на рис. 2.9, але прийняти, що з одного боку (примикання до мосту) рейка обпирається на опору, рис. 2.14.

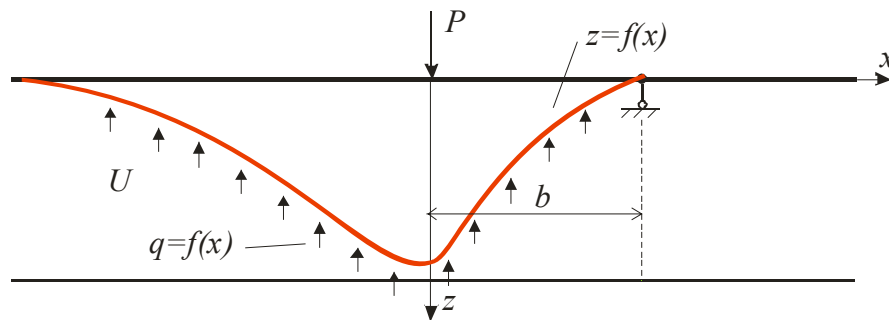


Рисунок 2.14 – Розрахункова схема прогину балки на ділянці підходу до мосту

Прогин балки буде описуватися класичним рівнянням – формула (2.33). При його розв’язанні наявність обпирання балки на опору буде враховане відповідною граничною умовою

$$z(b) = 0, \quad (2.46)$$

де b – відстань від точки прикладання сили (положення колеса) до моста.

Тоді прогин рейки (формула (2.36)) в частині від точки прикладання сили до моста буде визначатися за формулою

$$z(x) = \frac{Pke^{-kx}}{U(1 - \operatorname{tg} \beta)} (-\operatorname{tg} \beta \cos kx + \sin kx), \quad (2.47)$$

де $\beta = kb$ – показник відстані до моста.

Інші важливі характеристики – згинальний момент та сила, діюча на опору (використовується в інженерному розрахунку на міцність [22] для розрахунку напружень на поверхні шпали, в баласті та на основній площадці земляного полотна) – будуть визначатися по наступним формулам, отриманим за загальновідомими диференціальними співвідношеннями характеристик прогину балки:

$$M(x) = \frac{Pe^{-kx}}{2k(1 - \operatorname{tg} \beta)} (\cos kx + \operatorname{tg} \beta \sin kx); \quad (2.48)$$

$$Q(x) = \frac{Pkle^{-kx}}{1 - \operatorname{tg} \beta} (-\operatorname{tg} \beta \cos kx + \sin kx), \quad (2.49)$$

де l – відстань між осями шпал.

Формули (2.47-2.49) не протиріч^ать відповідним виразам у інженерних розрахунках на міцність [22] і можуть бути долучені до них безпосередньо.

Розглянемо приклад розрахунку ділянки колії з модулем пружності підрейкової основи 50 МПа з примиканням до мосту на відстані 1 м від точки прикладення сили 100 кН. Початок відліку по осі абсцис відповідає точці прикладання сили. Графік прогину рейки показано на рис. 2.15 (лінія «2»). Для порівняння показано прогин для випадку відсутності примикання до мосту (лінія «1»).

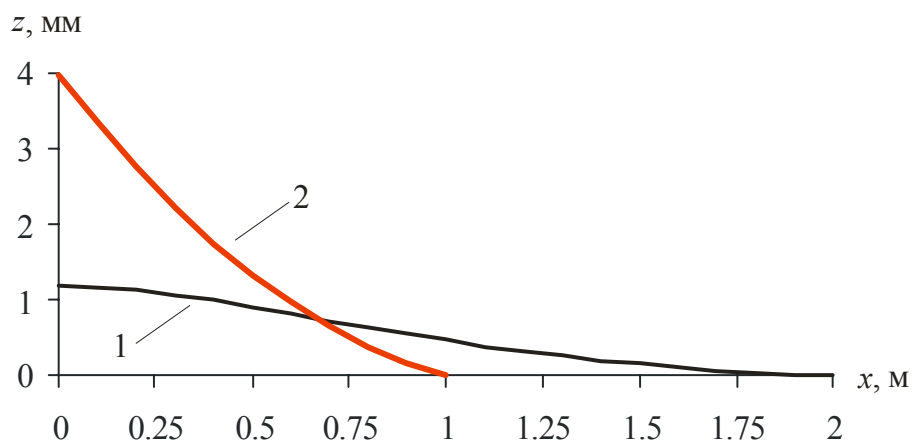


Рисунок 2.15 – Прогин рейки по довжині від точки прикладання сили: 1 – без примикання до мосту; 2 – з примиканням до мосту на відстані 1 м

Графіки зміни згинального моменту в рейці і сили, що діє від рейки на опору, для відповідних випадків показані на рис. 2.16 і 2.17 відповідно.

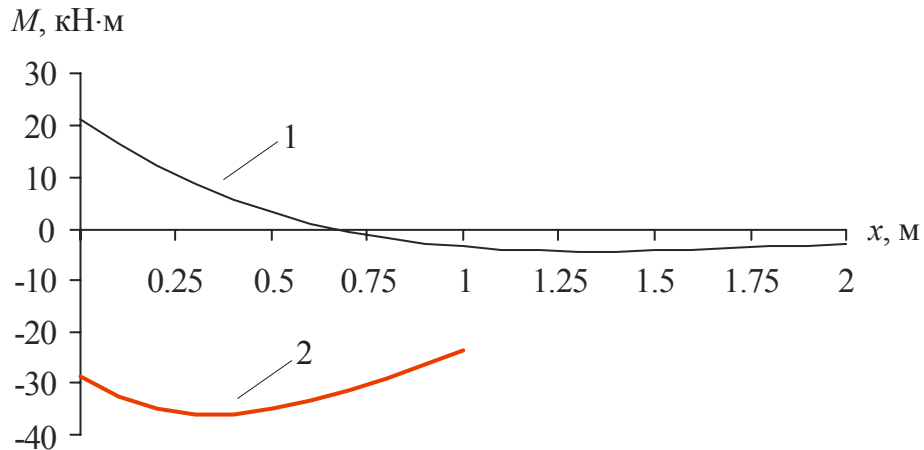


Рисунок 2.16 – Згинальний момент в рейці по її довжині: 1 – без примикання до мосту; 2 – з примиканням до мосту на відстані 1 м

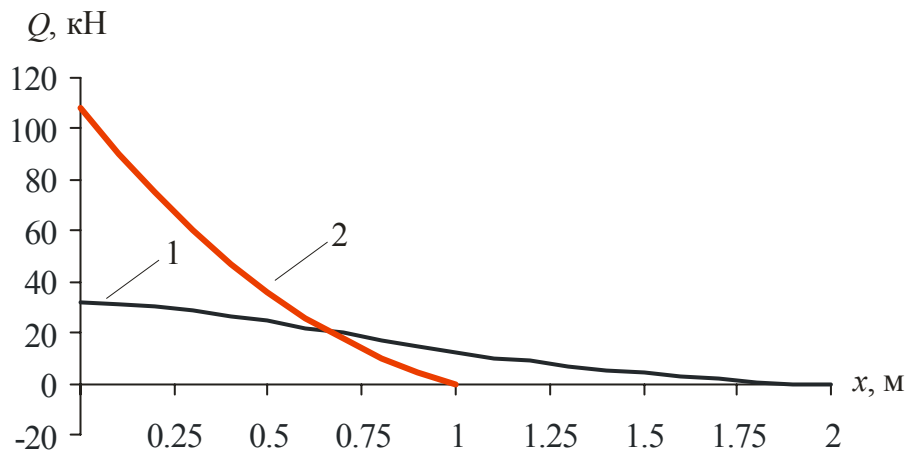


Рисунок 2.17 – Сила, діюча від рейки на опору: 1 – без примикання до мосту; 2 – з примиканням до мосту на відстані 1 м

З наведених графіків видно значний якісний і чисельний перерозподіл зазначених характеристик прогину рейки. Якщо згинальний момент (і відповідно згинальні напруження в рейці) змінює знак, але залишається приблизно того ж самого рівня, то сила, діюча на опору (і відповідно напруження в баласті і на основній площадці земляного полотна) зростає у 3,4 рази. Якщо проаналізувати залежність цього показника від відстані точки

прикладання сили до моста, то можна зазначити, що має місце набагато більше зростання сили, діючої на підрейкові елементи колії. Якісно такий графік показано на рис. 2.18.

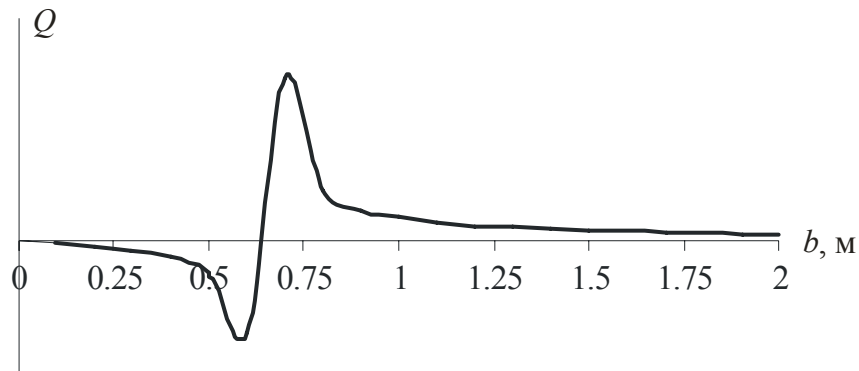


Рисунок 2.18 – Сила, діюча від рейки на опору в залежності від відстані між точкою прикладання сили і початком моста

Виходячи з рівняння (2.49), максимальна дія на підрейкову основу буде мати місце на відстані $\frac{\pi}{2k}$ між колесом і початком моста. Для розглянутого прикладу ця відстань складає приблизно 0,7 м.

Отриманні результати перерозподілу дії сил при різкій зміні модуля пружності (рис. 2.18) пояснюють первопричину утворення вертикальних нерівностей перед мостом. На подальший розвиток нерівності (більш пологому поширені далі від моста), окрім зазначених причин, будуть впливати динамічні ефекти дії від проходження рухомого складу по вже наявній нерівності колії, досліджені, наприклад, в роботі [111].

2.4.4 Аналіз впливу зміни жорсткості колії в межах переїзду

Розглянемо особливості конструкції колії в зоні переїзду, які впливають на характеристики її напружено-деформованого стану [115]. Настил сучасного залізничного переїзду як правило складається з трьох рядів залізобетонних плит. Для двохколійної ділянки кожен ряд має шість плит, які укладаються до і після рейки і мають обпирання з жорстким кріпленням до

залізобетонної шпали спеціальної конструкції, рис. 2.19. По довжині колії кожна плита прикріплена до п'яти шпал.

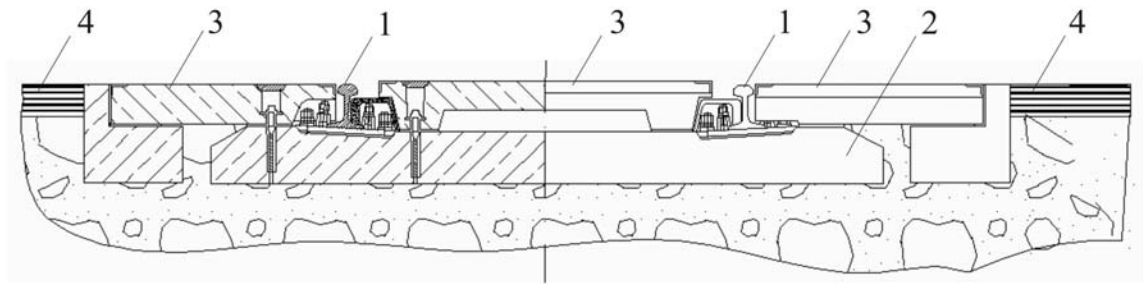


Рисунок 2.19 – Схема з'єднання плит зі шпалою на залізничному переїзді: 1 – рейка; 2 – залізобетонна шпала; 3 – залізобетонна плита; 4 – тротуарні плити

Під час прогину колії від дії рухомого складу плити переїзду будуть працювати як ребра жорсткості, поєднуючи вздовж плити вертикальні переміщення шпал і відповідно рейки (з невеликою вільністю за рахунок наявності підкладок). Врахувати спільну роботу на прогин описаної вище конструкції можна представивши її як балку з відповідним значенням моменту інерції. В приведенні до однієї рейки і враховуючи чергування шпал і міжшпального простору було визначено значення моменту інерції поперечного перерізу у вертикальному напрямку $4 \cdot 10^5 \text{ см}^4$.

Приклад прогину рейки від вертикальної сили 100 кН для модуля пружності підрейкової основи 50 МПа показано на рис. 2.20.

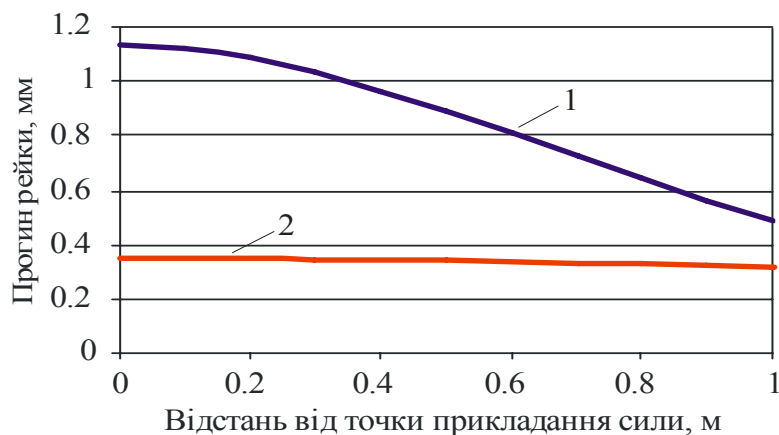


Рисунок 2.20 – Прогин рейки по довжині: 1 – звичайна колія; 2 – в межах переїзду

Дійсний модуль пружності підшпальної основи в зоні переїзду буде залишатися таким самим як і на іншій протяжності колії. При розташуванні навантаження в зоні переїзду можна прийняти розрахунковий модуль пружності підрейкової основи, який буде відповідати співвідношенню прогину до діючої сили (див. рис. 2.20). Виходячи з цих міркувань, при розташуванні коліс візка до (або після) і в межах переїзду розрахункові модулі пружності підрейкової основи для них будуть відрізнятися приблизно в 3 рази. Така різниця набагато менша у порівнянні з тією, що має місце в зоні переходу від баластної конструкції колії до безбаластної (наприклад, залізничний міст). Все ж таки це може бути причиною появи і розвитку залишкових вертикальних деформацій колії (просадок).

2.5 Вплив взаємодії колії і рухомого складу в горизонтальній площині на обмеження швидкостей руху

Збільшення швидкості руху на ділянці залізниці передбачає підвищені вимоги щодо якості проведення робіт з виправки й утримання кривих, необхідні нові підходи до розрахунків проектних параметрів плану та встановлення максимально допустимої швидкості руху поїздів. Ті допущення, що були прийняті раніше й слабо впливали на показники руху поїздів при швидкостях 100–120 км/год, потребують або зміни, або відповідного корегування при швидкостях 160 км/год і більше. При встановленні максимальної швидкості необхідно враховувати, що витрати на забезпечення того чи іншого рівня швидкості не повинні перевищувати доходи від її реалізації.

Питання усунення постійно діючих і тривалих обмежень швидкості руху є актуальними. В ряді випадках вони можуть бути розглянуті як оптимізаційні задачі. Сформульована таким чином проблема вибору послідовності реконструкції ділянки з метою встановлення максимально

допустимих швидкостей руху мала рішення в ряді наукових робіт, в тому числі за участю автора [128, 130, 133, 136, 139].

Для усунення причин обмеження швидкостей руху (бар'єрних місць) і отримання відповідного економічного ефекту за рахунок збільшення швидкості руху поїздів і усунення ділянок гальмування та розгону, необхідно проведення ремонтних робіт, що потребує певних витрат (капітальних вкладень). Слід враховувати, що капітальні вкладення носять одноразовий характер, а зменшення витрат буде мати місце протягом тривалого часу. Тому, в ряді випадків, для правильної оцінки економічного ефекту слід говорити про термін окупності капітальних витрат, а не про миттєву ефективність.

Точне значення капітальних витрат на усунення того чи іншого бар'єрного місця може бути визначено тільки шляхом складання калькуляції за проектом на виконання робіт для конкретної ділянки залізниці, з урахуванням потрібного переліку операцій, вартості й об'ємів матеріалів, наявності робочої сили, механізмів тощо. Однак, можна зазначити, що більшість бар'єрних місць – це довготривалі обмеження швидкості, які доцільно ліквідувати під час проведення планових ремонтів. Тому для попередньої оціни можна приймати в якості витрат на усунення бар'єрного місця вартість ремонту, під час якого будуть проводитись відповідні роботи, з урахуванням довжини ділянки, що обмежує швидкість руху.

Так, при комплексно-оздоровчому ремонті можуть бути усунені бар'єрні місця пов'язані з виправкою і рихтуванням колії машинними комплексами, ліквідацією місць виплесків, заміною дефектних рейок і непридатних шпал, очищенням водовідвідних споруд тощо.

При середньому ремонті можна планувати усунення бар'єрних місць, які потребують виконання робіт з очищення забрудненого баласту, заміни непридатних шпал, брусів і скріплень, виправлення кривих, ремонту переїздів, водовідвідних і укріпних споруд тощо.

Під час проведення реконструкції, технічного переоснащення або капітального ремонту можуть бути проведені роботи для усунення обмеженні швидкості пов'язані з очищенням щебеневого баластного шару і плануванням баластної призми, виправлення з постановкою колії у проектне положення в профілі, виправлення кривих в плані з відновленням проектних радіусів, збільшення радіусів кривих до передбачених проектом з відповідним перевлаштуванням земляного полотна та штучних споруд, приведення розмірів земляного полотна у відповідність до встановлених нормативів, ремонт водовідвідних і зміцнювальних споруд, реконструкція горловин станцій, ремонт або перевлаштування переїздів тощо.

В роботі [136] автор брав участь в розробці методики, яка дозволяє визначати допустиму швидкість руху поїздів в кривих, виконувати тягові розрахунки, оцінювати комфортабельність їзди, визначати механічну роботу сили тяги локомотива, роботу сил опору, роботу гальмівних сил, а також роботу вертикальних і горизонтальних сил. Для аналізу впливу підвищення швидкості руху на зношення колійної інфраструктури були виконані тягові розрахунки. Для прикладу, на рис. 2.21 показана зміна механічної роботи сили тяги локомотива. З рисунку видно, що значення цього фактору суттєво змінюються по довжині лінії, що залежить від параметрів поздовжнього профілю, плану, наявності обмежень швидкості, режиму ведення поїзду, швидкості руху тощо.

Для запобігання проблем експлуатаційного і технічного характеру, пов'язаних з можливістю розладів верхньої будови колії, порушень плавності й комфортабельності їзди при впровадженні швидкісного руху поїздів підвищується відповідальність до обґрунтованості рішень, в тому числі пов'язаних з встановленням максимально допустимих швидкостей руху поїздів в кривих ділянках колії.

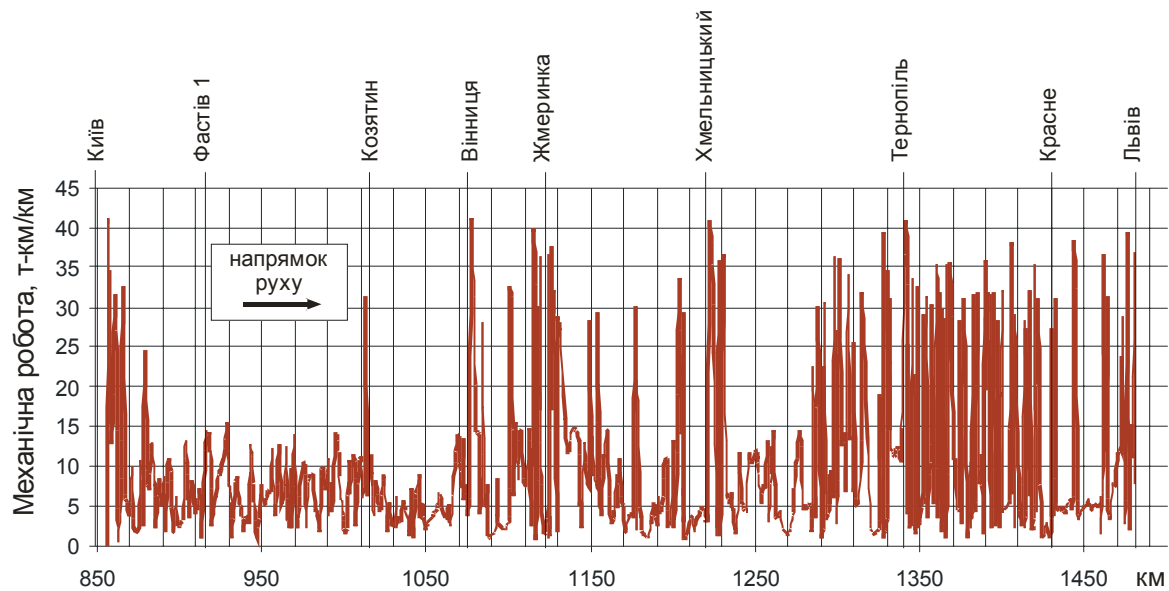
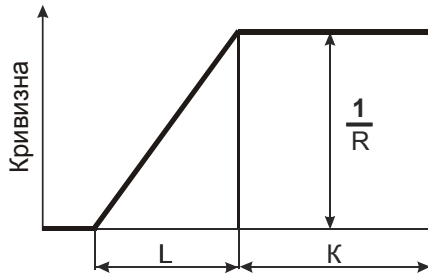


Рисунок 2.21 – Зміна механічної роботи сили тяги локомотива при русі пасажирського поїзда за напрямком Київ - Львів

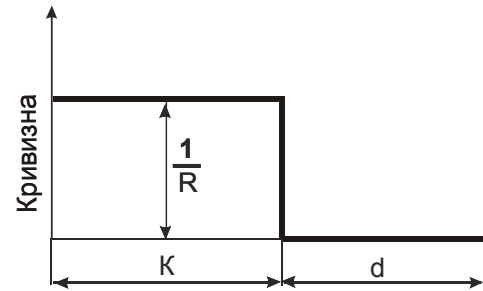
Задача визначення допустимої швидкості руху в кривих є складовою багатогранної наукової проблеми і описується у такому різноманітті: складові (багаторадіусні) криві; сполучені криві, розділені короткими прямими вставками; вірогідність вихідних даних; відступи в утриманні кривих та ін. Вивченню цих складових присвячена не одна наукова праця як у теоретичному, так і в експериментальному напрямках – [127, 129, 131, 203-205] та ін. В ЦП-0236 [150] методика визначення допустимих швидкостей руху по сполученням кривих викладена стисло. Тому при наявності складних сполучень кривих важко правильно визначити необхідний розрахунковий випадок, відповідні критерії та розрахункові формули й отримати вірний результат. Статистика підтверджує, що велика кількість сполучень кривих на залізницях України у деяких випадках призводить до недоцільного обмеження швидкостей руху або, навпаки, до їх завищення і, як наслідок, до погіршення комфортабельності руху поїздів та швидкого розладу колії.

Отже, основну увагу слід приділяти суміжним кривим, які підпадають до категорії залежних, одна з яких впливає на умови руху поїзда по іншій [204]. Для вирішення такого завдання була запропонована технологія визначення допустимої швидкості руху поїзда на ділянках складного плану,

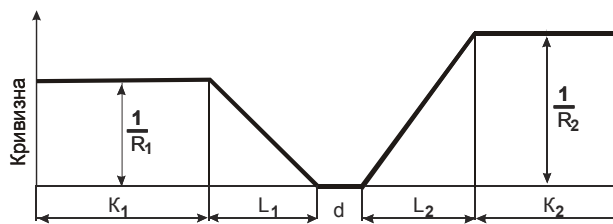
що передбачає покрокове виконання розрахунків в залежності від типу сполучень в точках зміни кривизни кривої [142], рис. 2.22.



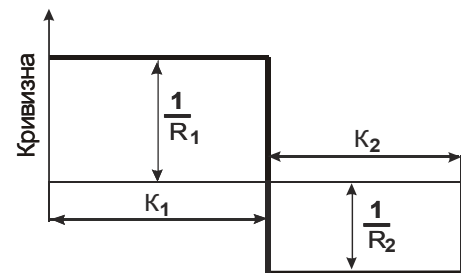
Сполучення 1: пряма-перехідна крива-
кругова крива
(Пряма; $L > 0$; K)



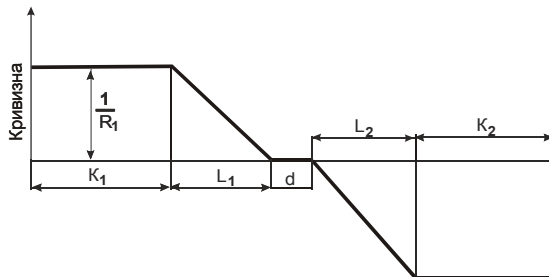
Сполучення 4: кругова крива-пряма
вставка
(K ; $L = 0$; $d > 0$)



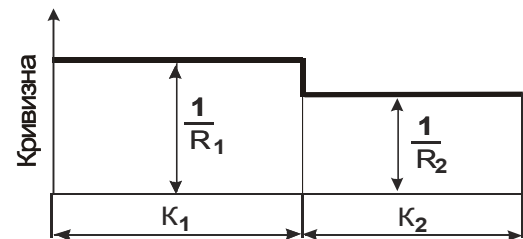
Сполучення 2: перехідна крива-пряма
вставка-перехідна крива
(K_1 ; $L_1 > 0$; $0 < d \leq 25$; $L_2 > 0$; K_2)



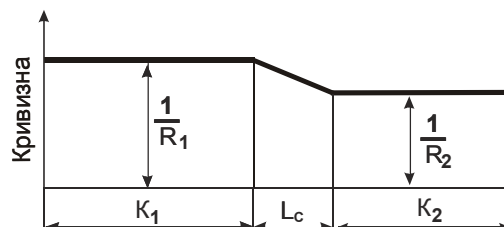
Сполучення 5: S-подібні кругові криві
без прямої вставки
(K_1 ; $L_1 = 0$; $d = 0$; $L_2 = 0$; K_2)



Сполучення 3: S-подібні криві розділені
прямою вставкою
(K_1 ; $L_1 \geq 0$; $0 < d \leq 25$; $L_2 \geq 0$; K_2)



Сполучення 6: сполучення
односторонніх кругових кривих
(K_1 ; $L_1 = 0$; $d = 0$; $L_2 = 0$; K_2)



Сполучення 7: кругова крива-проміжна перехідна крива-кругова крива
(K_1 ; $L_c > 0$; K_2)

Рисунок 2.22 – Класифікація сполучень кривих

При русі колеса по рейці наряду з вертикальними виникають й

горизонтальні сили, які притискають колесо до рейки. Враховуючи геометричні обриси колеса і рейки, такий процес може привести до зміщення точки їх контакту на реборду колеса і, у найгіршому випадку, до перекочування колеса через рейку. Як правило значення вертикальної сили достатньо, щоб унеможливити такий процес. Але при деяких умовах експлуатації можливе суттєве збільшення горизонтальних сил, або суттєве зменшення вертикальних. В обох випадках потрібна відповідна оцінка безпеки руху. Одним з показників взаємодії колії і рухомого складу, не виконання якого веде до порушення безпеки руху, а саме до сходу рухомого складу, є умова забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки [20, 206].

Сьогодні у літературі можна зустріти два варіанта методики розрахунку коефіцієнту стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки [148]. Розглянемо перший варіант, який описано у роботах [207] та інших. Основу методики складає розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою у точці контакту, рис. 2.23.

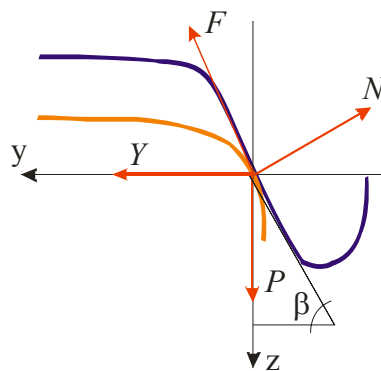


Рисунок 2.23 – Розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою у точці контакту [3]

Взаємозв'язок між силами можна визначити через рівняння статичної рівноваги їх проекцій на вертикальну і горизонтальну вісь

$$\begin{cases} Y - N \sin \beta + \mu N \cos \beta = 0; \\ P - N \cos \beta - \mu N \sin \beta = 0 \end{cases}, \quad (2.50)$$

де P – вертикальне навантаження колеса на рейку;

Y – горизонтальна сила тиску від колеса на рейку;

N – реакція рейки;

μ – коефіцієнт тертя;

F – сила тертя, що протидіє зісковзуванню колеса, $F = \mu N$;

β – кут нахилу гребня колеса.

Тоді умову рівноваги можна записати у вигляді

$$\frac{Y}{P} \leq \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta}. \quad (2.51)$$

Для локомотивів з кутом нахилу гребня колеса $\beta = 70^\circ$ і розрахунковим значення коефіцієнта тертя $\mu = 0.25$ гранична значення відношення горизонтальної сили до вертикальної складає 1,48. З урахуванням запасу надійності остаточно приймається умова [207]

$$\frac{Y}{P} \leq 1.2. \quad (2.52)$$

Другий варіант методики викладений у таких роботах, як [22, 206] та інших. Різниця полягає у наступному: застосовується зворотне відношення сил – вертикальної до горизонтальної; характеристики тертя і обрису бандажа не поглинаються у допустиме значення коефіцієнта стійкості. Тоді вирішення системи рівнянь (2.50) приймає наступний вигляд

$$\frac{P}{Y} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta} \geq [k]. \quad (2.53)$$

Мінімальне допустиме значення коефіцієнту запасу стійкості проти сходу колісної пари з рейок $[k]$ затверджено у галузевій інструкції ЦП-0235 [208]: 1,4 – для локомотивів, 1,3 – для вантажних вагонів, 1,6 – для пасажирських вагонів. Якщо фактичне значення коефіцієнту менше вказаних значень – це привід обмеження швидкості руху або переглядання встановлених умов експлуатації.

Таким чином умова забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки записується як співвідношення сил, що перешкоджають підйому колеса до сил, що прагнуть підняти колесо [20]. До

підйому колеса приводить дія горизонтальних сил, перешкоджає підйому вертикальна сила. Будь-які сили взаємодії колії і рухомого складу мають динамічний характер і є результатом складного поєднання дії декількох факторів. Регламентуючи значення таких сил (або їх співвідношення) потрібно чітко визначати методику і умови їх обчислення або виміру.

Під горизонтальною силою може матися на увазі одна з трьох сил: направляюча сила – тиск від реборди направляючого колеса на рейку, або бічна сила – тиск від колеса в цілому на рейку, або рамна сила – тиск на рейку в цілому від колісної пари.

Як правило, рамна сила є результатом натурних вимірів за допомогою датчиків, встановлених на рухомому складі; бічна сила визначається через напруження, які виміряні датчиками, встановленими на рейці; направляюча сила – результат аналітичних розрахунків. Звісно всі прояви горизонтальних сил мають загальновідомі аналітичні співвідношення.

Наведені вище два варіанта методики розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки є тотожні і не суперечать один одному. Але близькі показники допустимих значень при зворотних формулах іноді приводять до плутанини щодо оцінки результатів досліджень отриманих в тій чи іншій роботі. Враховуючи, що методика з виразом (2.53), крім інших джерел, закріплена у діючій інструкції ЦРБ-0036 [206], доречним є дотримуватись саме такого підходу.

Характеристики коефіцієнту тертя і кута нахилу бандажа колеса, що мають місце у формулі (2.53), наведені у табл. 2.2 на основі даних [20].

Таблиця 2.2 – Розрахункові характеристики для коефіцієнту стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку

Тип рухомого складу	Числові характеристики		
	β , град.	μ	$\frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu tg\beta}$
Локомотив	70	0.2	1.644
		0.25	1.481
Вагон	60	0.2	1.138
		0.25	1.034

Таким чином для практичних розрахунків стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки при звичайних умовах експлуатації можна рекомендувати наступні вирази:

– для локомотивів

$$\frac{1.644P}{Y} \geq 1.4; \quad (2.54)$$

– для вантажних вагонів

$$\frac{1.138P}{Y} \geq 1.3; \quad (2.55)$$

– для пасажирських вагонів

$$\frac{1.138P}{Y} \geq 1.6. \quad (2.56)$$

Порушення умови (2.56) може мати місце не тільки при збільшенні горизонтальної сили, а і при зменшенні вертикальної, що властиво «легким» пасажирським вагонам. Як приклад розглянемо рух пасажирського вагону на візках КВЗ-ЦНИИ у кривій радіусом 1000 м, який має розрахункове статичне навантаження від колеса на рейку 71,25 кН [20, 22]. Значення горизонтальної (бокової) сили за розрахунками буде у межах 29,4...44,2 кН для непогашеного прискорення 0...0,7 м/с² відповідно, і продовжить зростати при подальшому збільшенню непогашеного прискорення. Результати розрахунків показані на рис. 5.

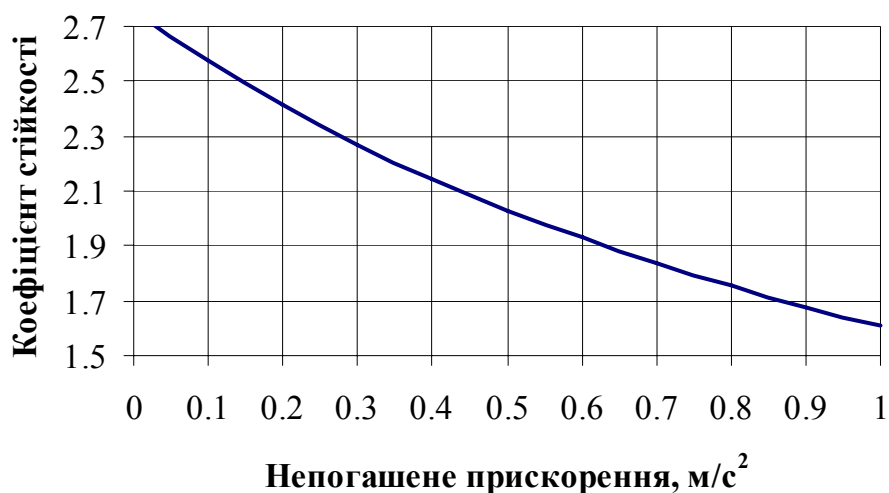


Рисунок 2.24 –Залежність коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку для пасажирського вагону у кривій ділянці з радіусом 1000 м

При значенні непогашеного прискорення $1,0 \text{ м/с}^2$, що може мати місце в окремих випадках, значення коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки наближається до допустимої межі 1,6.

Комфортабельність їзди пасажирів, особливо при високих швидкостях руху, слід оцінювати не тільки за непогашеними поперечними, а й за вертикальними і поздовжніми прискореннями, що виникають при русі по переломах поздовжнього профілю і при різких змінах режимів ведення поїзду, тобто комфорт пасажира може визначатися за повними прискореннями $\alpha_{нов}$, що діють на пасажира (прототип європейського коефіцієнта N [205]):

$$\alpha_{нов} = \sqrt{\alpha_{nn}^2 + \alpha_{верт}^2 + \alpha_{позд}^2} . \quad (2.57)$$

де α_{nn} – непогашене поперечне прискорення, що виникає при русі по кривим у плані;

$\alpha_{верт}$ – вертикальне прискорення при русі по криволінійній ділянці поздовжнього профілю, м/с^2 ; може бути визначено як

$$\alpha_{верт} = \frac{V_{\max \text{ нс}}^2 \cdot 10^{-3}}{3,6^2 R_{\text{г}}} , \quad (2.58)$$

R_g – радіус вертикальної кривої, що описує сполучення елементів поздовжнього профілю.

$\alpha_{позд}$ – поздовжнє прискорення, пов'язане з процесами гальмування і розгону; визначаються при виконанні тягових розрахунків, як зміна швидкості руху поїзда за одиницю часу.

Прискорення $\alpha_{позд}$, що пов'язані з розгоном і гальмуванням поїзда, досягають значень 0,7-1,0 м/с² при службовому і до 2,0 м/с² при повному (екстреному) гальмуванні.

Відповідна оцінка самопочуття пасажирів, що увійшла до інструкції [18], наведена у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення радіусів вертикальних кривих, що відповідають різним оцінкам самопочуття пасажирів

Оцінка самопочуття пасажирів	$R_{верт}^{кр}$, м, для швидкості руху, V км/год		$\alpha_{верт}$, м/с ²
	$V = 140$	$V = 160$	
Відмінно	15000	20000	до 0,10
Добре	11000	15000	0,11...0,15
Задовільно	8000	10000	0,16...0,20

2.6 Висновки до розділу 2

1. Математичні моделі, які протягом тривалого часу стало звично застосовувати для опису напружено-деформованого стану залізничної колії, з одного боку, є обґрунтованим компромісом між складністю й можливостями для певного переліку задач, але з іншого – мають чіткі межі застосування.

2. На значення розрахункової вертикальної сили, що діє від колеса на рейку, впливає багато факторів. При практичних розрахунках колії на міцність вона формується з декількох складових. Їх вплив при різних рівнях швидкостей руху не однаковий. За аналізом результатів аналітичних розрахунків встановлено, що за впливовістю різних динамічних складових можна відокремити такі швидкісні зони: до 80...100 км/год, 120...250 км/год,

більше 250 км/год. Основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів, що рухаються з швидкостями 120 км/год і більше, є коливання системи «колесо-рейка», тобто проходження колесом динамічної рейкової нерівності.

3. Запропоновано аналітичний метод урахування локальної зміни модуля пружності підрейкової основи засобом корегувальних коефіцієнтів в рамках практичного розрахунку колії на міцність. Встановлено, що наявність локального зменшення пружності підрейкової основи (наприклад, у місці просадки) може збільшувати згинаючі напруження в рейках до 25%.

4. Розроблено розширення практичного розрахунку колії на міцність для врахування різкої зміни модуля пружності підрейкової основи при сполученні різних типів конструкцій (наприклад, при переході з баластної конструкції колії на міст). Отримано характеристику зміни сил, діючих від рейки на основу, в залежності від відстані до моста на ділянці підходу з баластної конструкції колії, що дає інструмент для оцінювання та прогнозування розвитку нерівностей.

5. При русі пасажирських вагонів з двовісними візками з непогашеним прискоренням 1.0 м/с^2 і більше коефіцієнт стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки наближається до мінімального допустимого значення, що повинне враховуватися при вирішенні задач збільшення швидкостей руху у кривих ділянках колії. Після підбору параметрів кривих, особливо це стосується складових і сполучених, можна підвищити швидкість руху прискорених і швидкісних поїздів і скоротити час руху. Для цього потрібно виконати розрахунки в повному обсязі відповідно до методики, викладеної в ЦП-0236 з урахуванням уточнень і рекомендацій.

РОЗДІЛ 3

ПРОСТОРОВА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ

3.1 Формування рівнянь геометрії простору, залученого до взаємодії

Для отримання первинних загальних положень рівнянь поширення напружень в товщі матеріалу приймемо низку положень: розглядається тривимірний простір у декартовій системі координат; сила до об'єкту прикладається в точці, яка співпадає з початком координат; напрямок дії сили співпадає з віссю «у», а поверхня об'єкту, на якій розташована точка прикладання сили, лежить в площині «xz»; простору, який вступив у взаємодію з силою на мить t , відповідає множина точок, обмежена поверхнею – фронт взаємодії, яку, у відповідності до хвильової природи процесу, можна описати рівняннями еліпсоїда, яке відповідає фронту поширення просторової хвилі, рис. 3.1.

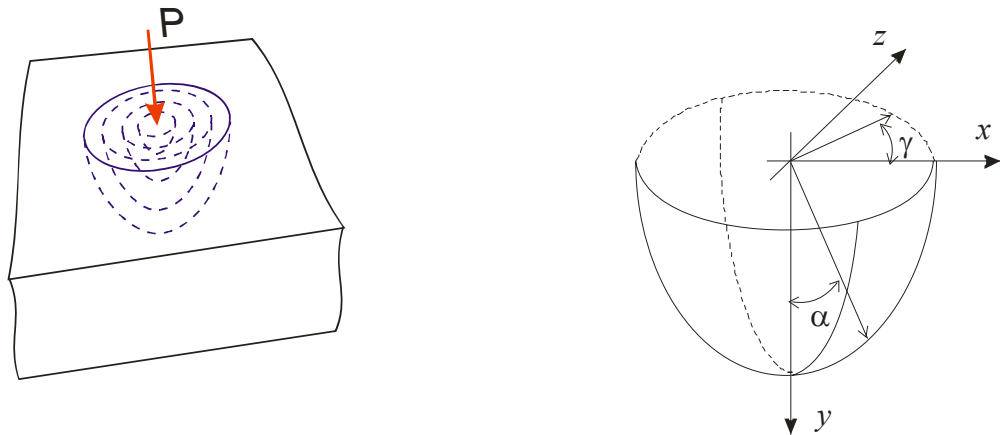


Рисунок 3.1 – Поверхня фронту хвилі у прийнятій системі координат

Тоді положення точок, які належать поверхні еліпсоїду, будуть підпорядковані рівнянню

$$\begin{cases} \frac{y^2}{C_l^2 t^2} + \frac{x^2}{C_t^2 t^2} = 1; \\ \frac{x^2 + z^2}{C_t^2 t^2} = 1. \end{cases}, \quad (3.1)$$

де C_t , C_l – поперечна та поздовжня швидкість поширення хвилі відповідно.

Швидкості поширення хвиль в середовищі є параметрами, які залежать від її фізичних характеристик і можуть бути визначені за формулами [91-96]

$$\left. \begin{aligned} C_l &= \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \\ C_t &= \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \end{aligned} \right\}, \quad (3.2)$$

де E – модуль пружності Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона; ρ – щільність речовини.

Геометричне положення точок фронту взаємодії будемо знаходити у векторному вигляді, рис. 3.2. Довжина вектору за напрямком α з формули (3.1) буде визначатися як

$$v = tC_\alpha, \quad (3.3)$$

де C_α – швидкість поширення просторової хвилі за напрямком α

$$C_\alpha = \frac{C_l C_t}{\sqrt{C_t^2 \cos^2 \alpha + C_l^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (3.4)$$

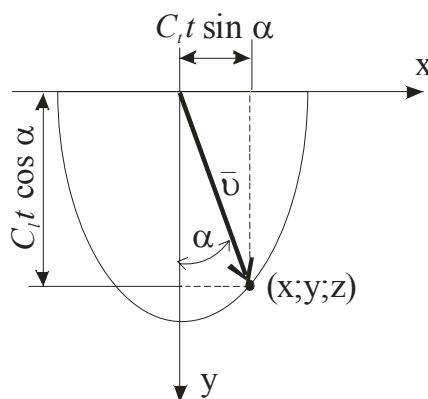


Рисунок 3.2 – Вектор для визначення геометричного місця точки на поверхні фронту взаємодії

Векторний підхід можна застосовувати при визначенні положення поверхні взаємодії для моменту часу t_2 відносно попереднього кроку розрахунку для часу t_1 , рис. 3.3.

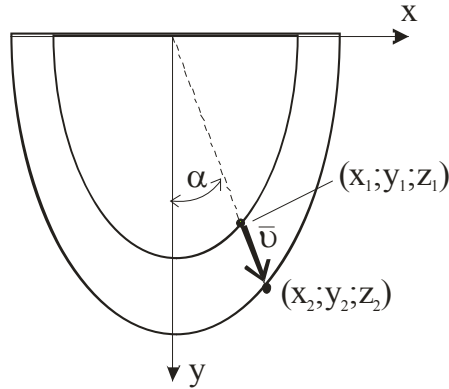


Рисунок 3.3 – Вектор розширення простору взаємодії на кроці Δt

Тоді вектор буде визначати розширення простору взаємодії у заданому напрямку $(\alpha; \gamma)$: $\vec{v} = (x_2; y_2; z_2) - (x_1; y_1; z_1)$, а координати кінця вектору будуть підпорядковані виразу

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_1 + \Delta x; y_2 = y_1 + \Delta y; z_2 = z_1 + \Delta z; \\ \Delta x &= r \cos \gamma; \Delta z = r \sin \gamma; \\ \Delta y &= v \cos \alpha; r = \sqrt{v^2 - \Delta y^2}; \\ v &= \Delta t C_\alpha; \\ \Delta t &= t_2 - t_1; \\ \alpha &\in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]; \gamma \in [0; 2\pi]. \end{aligned} \right\}, \quad (3.5)$$

Приклад поверхні, побудованої за викладеною методикою, для одного кроку розрахунку показано на рис. 3.4 (для візуального сприйняття задано великі значення часового та кутових кроків розрахунку). Наведений алгоритм був описаний автором в роботі [82].

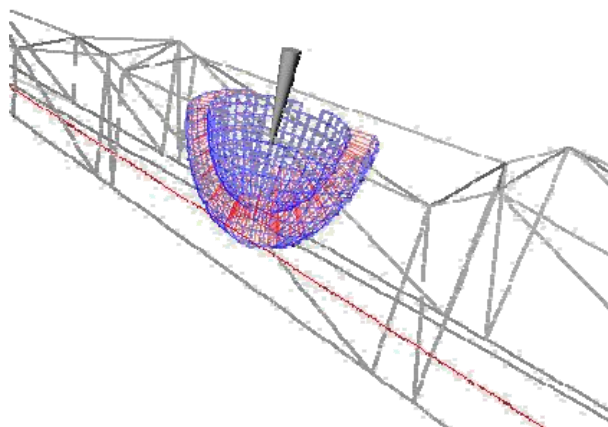


Рисунок 3.4 – Приклад побудови поверхні фронту поширення

Перехід від локальної системи координат до глобальної. Для загального випадку, коли точка прикладання і напрямок дії сили може бути вільним, для кожної точки, розрахованою за наведеною методикою, виконується перетворення координат з урахуванням зміщення та повороту системи виміру, рис. 3.5.

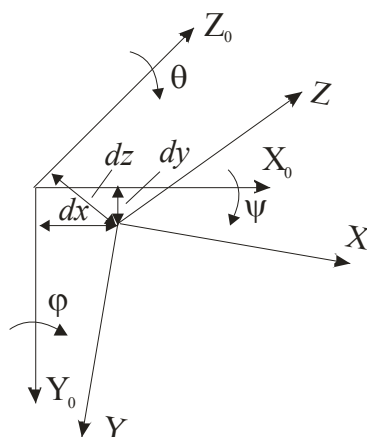


Рисунок 3.5 – Схема переходу від локальної системи координат до глобальної

За наведеними на рис. 3.5 позначеннями зміщень і кутів, рівняння перетворення будуть мати вигляд

$$\left. \begin{aligned} rx &= (\cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \cos \theta \sin \varphi) x_0 + \\ &(-\cos \psi \sin \varphi - \sin \psi \cos \theta \cos \varphi) y_0 + (\sin \psi \sin \theta) z_0; \\ ry &= (\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \cos \theta \sin \varphi) x_0 + \\ &(-\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \theta \cos \varphi) y_0 + (-\cos \psi \sin \theta) z_0; \\ rz &= (\sin \theta \sin \varphi) x_0 + (\sin \theta \cos \varphi) y_0 + (\cos \theta) z_0; \\ x &= rx + dx; \\ y &= ry + dy; \\ z &= rz + dz. \end{aligned} \right\}, \quad (3.6)$$

де $(x_0; y_0; z_0)$ – вихідні координати точки (локальна система координат);

dx, dy, dz і ψ, φ, θ – відповідно зміщення і повороти системи координат при переході від локальної до глобальної;

$(x; y; z)$ – остаточні координати точки (глобальна система координат).

3.2 Корегування геометрії поширення простору взаємодії обрисами об'єктів

3.2.1 Обмеження простору взаємодії обрисом об'єкту

Поширення простору взаємодії повинно обмежуватися геометричним обрисом об'єкту. Якщо на поточному кроку розрахунку поверхня фронту перетинає межі об'єкту, поширення простору взаємодії буде або припинятися, або перероджуватися у поверхневу хвилю, або переходити у інший об'єкт зі зміною характеристик поширення до відповідності з властивостями нового об'єкту.

Перетинання фронтом меж об'єкту має місце коли один або декілька векторів, з яких формується поверхня фронту, на даному кроку розрахунку перетинає одну із стінок, які обмежують поверхню об'єкту. Для вирішення задачі з точки зору геометрії, стінки об'єкту розглядаються як набір трикутників, які задаються координатами вершин. Застосовується саме такий підхід, тому що трикутник однозначно визначає рівняння площини. Тоді перевірка на перетинання вектором стінки об'єкту складається з двох етапів:

- 1) визначається, чи існує спільна точка, яка належить і вектору і площині, визначеною трикутником;
- 2) визначається, чи знаходиться така точка саме в межах трикутника.

Перший етап, рис. 3.7.

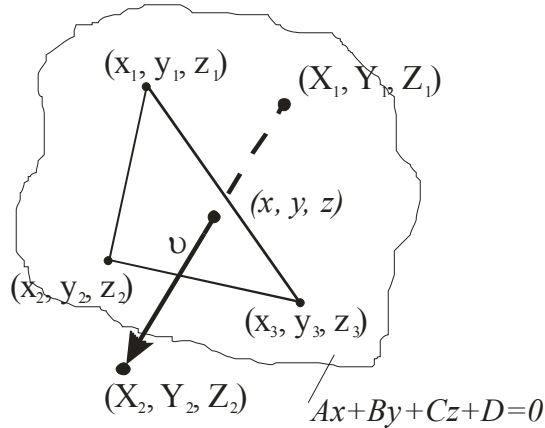


Рисунок 3.7 – Перетинання вектором площини, яка визначена рівнянням трикутника

Рівняння площини будемо знаходити у вигляді

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (3.7)$$

Тоді

$$\left. \begin{aligned} A &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2); \\ B &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2); \\ C &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2); \\ D &= -[x_1(y_2z_3 - y_3z_2) + x_2(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_2 - y_2z_1)] \end{aligned} \right\}; \quad (3.8)$$

де $(x_i; y_i; z_i)$ – координати i -ї вершини трикутника.

Допоміжні величини

$$\left. \begin{aligned} l &= X_2 - X_1; \\ m &= Y_2 - Y_1; \\ n &= Z_2 - Z_1 \end{aligned} \right\}; \quad (3.9)$$

де $(X_i; Y_i; Z_i)$ – координати кінців вектора $\vec{v}$.

$$p = -\frac{AX_1 + BY_1 + CZ_1 + D}{Al + Bm + Cn}. \quad (3.10)$$

Якщо $p \neq \infty$ (знаменник у формулі (3.10) не дорівнює нулю), то пряма, на якій лежить вектор $\vec{v}$, і визначена площина мають точка перетину, яка знаходиться по координатам

$$\left. \begin{aligned} x &= X_1 + lp; \\ y &= Y_1 + mp; \\ z &= Z_1 + np \end{aligned} \right\}; \quad (3.11)$$

Якщо точка перетину належить вектору $(x; y; z) \in \vec{v}$, то не тільки пряма, а і сам вектор перетинає площину. Це буде мати місце при дотриманні умов

$$x \in (X_1; X_2); \quad y \in (Y_1; Y_2); \quad z \in (Z_1; Z_2). \quad (3.11a)$$

Другий етап. Якщо точка перетину вектора і площини існує і визначена, треба переконатися, що вона входить у межі трикутника, який визначав рівняння площини. Використовуючи вершини вихідного трикутника і точку перетину, можна побудувати три додаткові трикутника, рис. 3.8. Якщо сумарна площа нових трикутників дорівнює площі вихідного трикутника, то точка перетину лежить у його межах. Тобто, для того щоб вектор перетинав саме внутрішність трикутника повинна виконуватися умова

$$S_{ABO} + S_{ACO} + S_{BCO} = S_{ABC}. \quad (3.12)$$

Якщо точка перетину не належить вихідному трикутнику, сумарна площа трьох новоутворених трикутників буде більше площі вихідного трикутника, рис. 3.9.

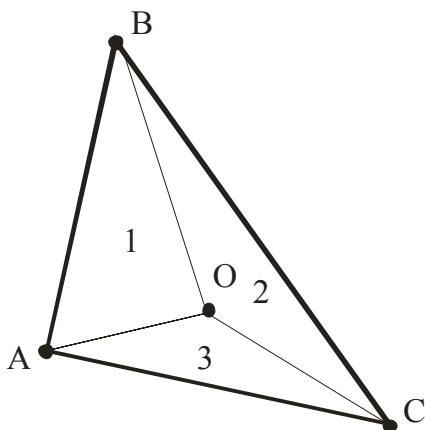


Рисунок 3.8 – Точка перетину площини в межах трикутника

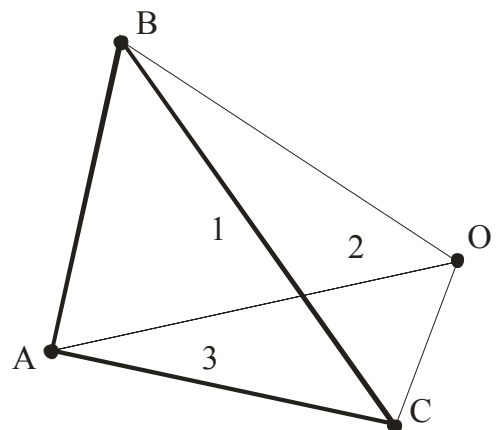


Рисунок 3.9 – Точка перетину площини за межами трикутника

Враховуючи те, що трикутники задаються координатами вершин, площу можна визначати за формулою Герона

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (3.13)$$

де
$$p = \frac{a+b+c}{2}; \quad (3.14)$$

a, b, c - довжини сторін трикутника

$$\left. \begin{aligned} a &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}; \\ b &= \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}; \\ c &= \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (3.15)$$

3.2.2 Входження поля векторів в наступний об'єкт

Якщо з'ясовано, що вектор $\vec{v}$ на даному кроці розрахунку перетнув стінку об'єкта, в якому знаходився, і розраховано координати точки перетину $(x; y; z)$, треба перевірити, чи являється ця точка одночасно входом вектора у інший об'єкт. Для цього перебираються всі площини об'єктів, з яких складається система, за виключенням об'єкту, з якого вийшов вектор. Координати точки підставляються у формулу площини (формула (3.11)) на перевірку її дійсності. Якщо точка належить площині, перевіряється її входження у границі трикутника, який визначив площину (формула (3.12)). При виконання всіх розглянутих умов констатується факт входження вектора у новий об'єкт. Якщо входження у новий об'єкт не знайдено, маємо вихід хвилі у повітря (на поверхню). Для визначення фізично відчутних напружень і деформацій (на даному етапі коливаннями на частотах звука нехтуємо) приймається, що якщо вектор вийшов у повітря, подальшого поширення в системі він не має.

Якщо вектор перейшов у наступний об'єкт, треба відкоригувати координати його кінця, тому що швидкість його поширення змінилася. Якщо за швидкістю першого об'єкта були розраховані координати кінця вектору

$(X_2; Y_2; Z_2)$, то нові координати з поправкою на зміну швидкості позначимо як $(X'_2; Y'_2; Z'_2)$, рис. 3.9.

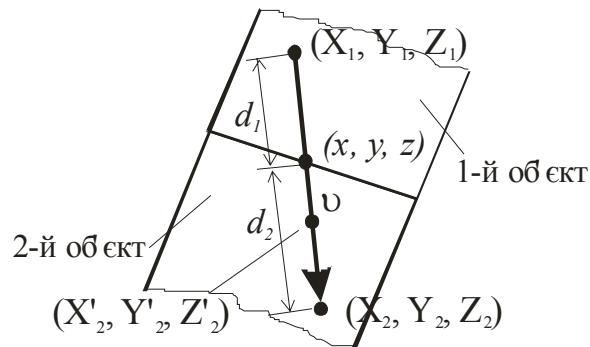


Рисунок 3.9 – Перехід вектору з одного об'єкту у наступний

Шлях, який вектор встиг пройти у межах 1-го об'єкта

$$d_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2}, \quad (3.16)$$

де $(x; y; z)$ - точка перетинання межі об'єктів.

Шлях, який би пройшов вектор у межах другого об'єкту, якщо б швидкість не змінювалась

$$d_2 = C_\alpha \Delta t - d_1, \quad (3.17)$$

де C_α - швидкість поширення вектору у першому об'єкті.

Тоді час, який залишився вектору на рух у другому об'єкті

$$\Delta t' = \frac{d_2}{C_\alpha}. \quad (3.18)$$

Швидкість поширення вектору, враховуючи його напрямок і характеристики другого об'єкта, може бути визначена за формулою (3.11). Далі приймається, що вектор має початок у точці перетину $(x; y; z)$, а координати кінця розраховуються за формулою (3.13), враховуючи нову швидкість і приймаючи на цю мить розрахунку, що $\Delta t = \Delta t'$.

3.2.3. Геометрія поширення фронту взаємодії для обмеженого простору

Підходи, що зараз розглядаються, відповідають деформації стиснення (розтягування), що більш відповідає баласту та земляному полотну. Можна погодитись, що армована залізобетонна шпала не працює на стискання, можна погодитись, що вона й не працює на вигин – її коефіцієнт вигину (див. формулу (2.9)) наближається до одиниці. Як було показано при обґрунтуванні формули (2.11), в більшості моделей шпала розглядається як абсолютно жорстке тіло – передає крізь себе силу від рейки на баласт не змінюючи її, тобто без пружної обробки. Деформації вигину будуть розглядатися в п.3.4.3.

В рамках даної моделі важливо не нехтувати проходженням фронту взаємодії крізь тіла шпал, що забезпечить отримання вірних обрисів контакту і передачі тиску на баласт (п.3.3.4).

Крім того, шпала є гарним прикладом об'єкту обмеженого простору, на прикладі якого можна наглядно розглянути розв'язання поставленої задачі. Геометрія обрису шпали задається як масив координат трикутників, які складають її поверхню. Цього достатньо, щоб виконувати перевірки знаходження векторів фронту поширення «в» або «за» її межами (див. п.3.3.1). Масив таких координат для залізобетонної шпали Ш-1-1 наведено в табл. А.1 додатку А. Для створення прикладу поширення фронту взаємодії в центрі площадки для підкладки була прикладена поодиноким вертикальна сила. Від її дії з часовими кроками розрахунків поширюються фронт простору, в якому виникають деформації – який вступає у взаємодію. Геометричний обрис фронту поширення відповідає формулі (3.1) та алгоритму (3.5). Послідовність зміни обрису для різних часових відміток показано на рис. 3.10. Так, на рис. 3.10а фронт поширення ще повністю знаходиться в тілі шпали і повторює форму еліпсоїда; потім фронт поширення обмежується стінками шпали – спочатку з боків (рис. 3.10б), а потім знизу (рис. 3.10в), після чого продовжує поширюватися по довжині шпали (рис. 3.10г).

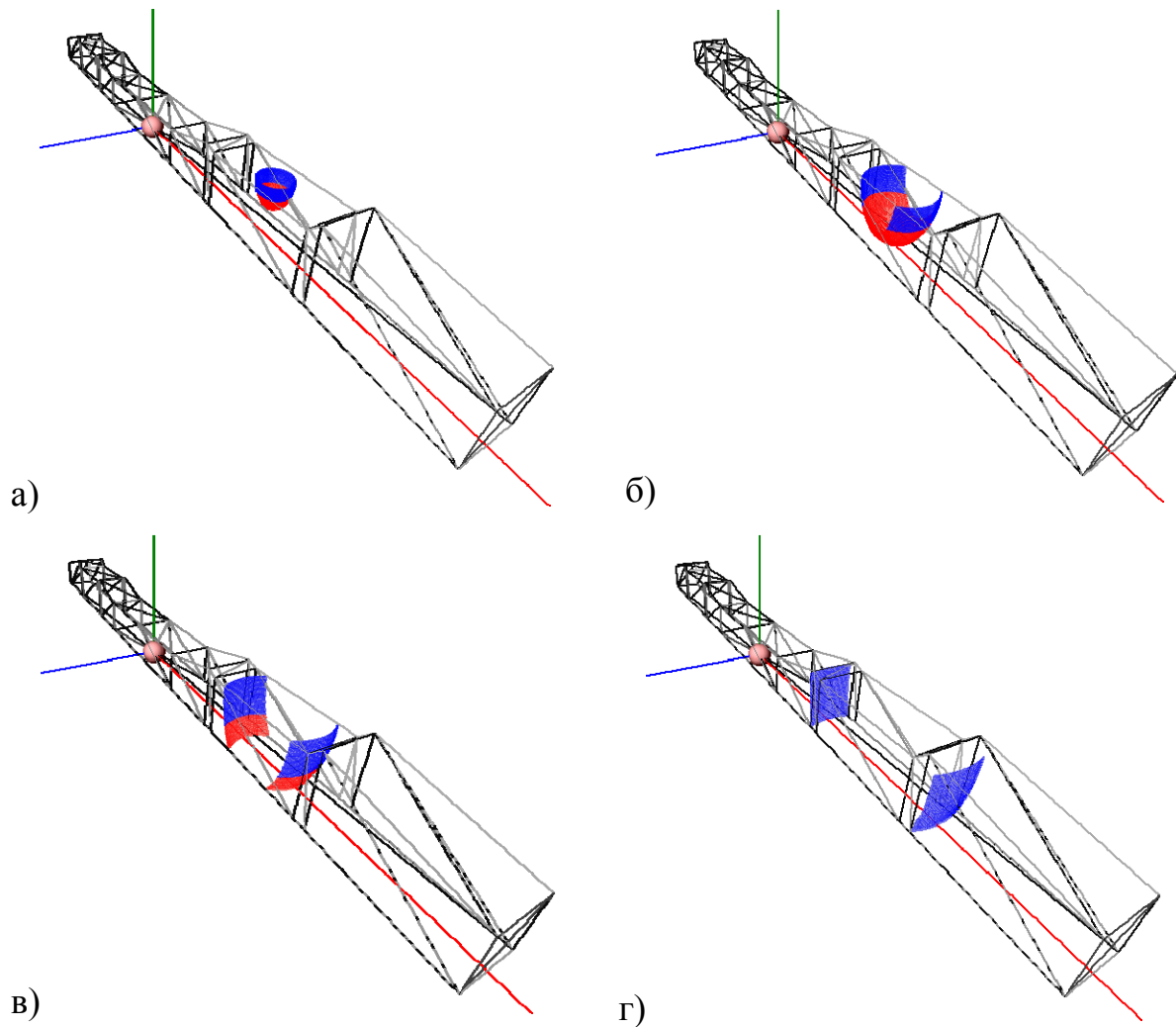


Рисунок 3.10 – Приклад обрізання простору взаємодії обрисом шпали:
умовно точки поверхні, які відповідають кінцям векторів з перевагою
вертикального напрямку ($\alpha \leq 45^\circ$) показано **червоним** кольором, з перевагою
горизонтального напрямку ($\alpha > 45^\circ$) – **синім**.

3.2.4. Геометрія переходу фронту поширення з одного об'єкта в наступний

Якщо описувати взаємодію шпали і баласту у відповідності до просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, потрібно звернути увагу на деякі особливості. В процесі переходу фронту поширення деформацій зі шпали в баласт, площа їх взаємодії буде змінюватися в часі – збільшуватися від точки до всієї поверхні шпали,

зануреної в баласт. З першої миті такої взаємодії напруження почнуть поширюватися в товщі баласту в різних напрямках з різними швидкостями (система (3.1) і, як наслідок, формула (3.4), але швидкості їх поширення по поверхні баласту будуть значно меншими швидкості росту площі, по якій тиск передається від шпали на баласт. Це приводить до суттєвої зміни обрису фронту поширення простору взаємодії у порівнянні з еліпсоїдною формою. Вона набуває якби вигляду воронки.

Потрібне рішення забезпечується шляхом відповідної обробки множини векторів, що утворюють поверхню фронту поширення. Поширення фронту в новому об'єкті в даній точці починається одразу, як відповідний вектор з попереднього об'єкту перетне поверхню контакту. Якщо щільність попереднього об'єкту більше за щільність наступного, то це відбудеться раніше, ніж хвиля прийшла б у цю точку за «власною» швидкістю другого об'єкту.

Крім того, поширення хвилі по поверхні другого об'єкту не припиняється після виходу за межі площадки контакту з попереднім. Для цього вектори, які при виходу з першого об'єкту потрапили у повітря (наприклад, бічна сторона шпали, виступаюча над баластом), не видаляються з даної множини векторів, а проєцируються до наступного об'єкта у вигляді точці на його поверхні з відповідними координатами. Після поширення хвилі до цього місця, відсутній вектор знову активується.

Подальші вирази, визначені для множини векторів залишаються дійсними.

На рис. 3.11 показано приклад поширення простору взаємодії при переході із шпали в баласт. На рис. 3.12 наведено приклад поширення фронту взаємодії в елементах залізничної колії для одного з часових кроків розрахунку від навантаження у вигляді двох вертикальних зосереджених сил.

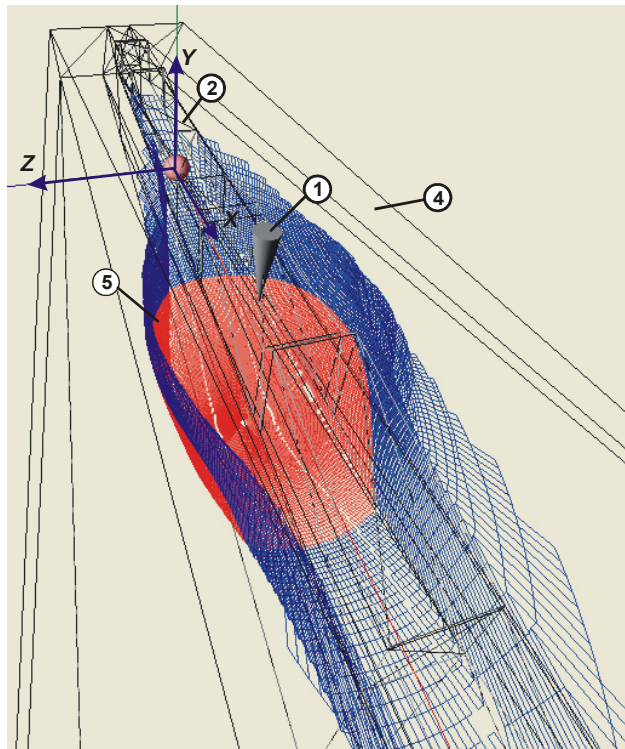


Рисунок 3.11 – Приклад поширення фронту взаємодії при переходу із шпали в баласт: 1 – прикладена сила; 2 – шпала; 4 – баласт; 5 – обрис простору, залученого до взаємодії

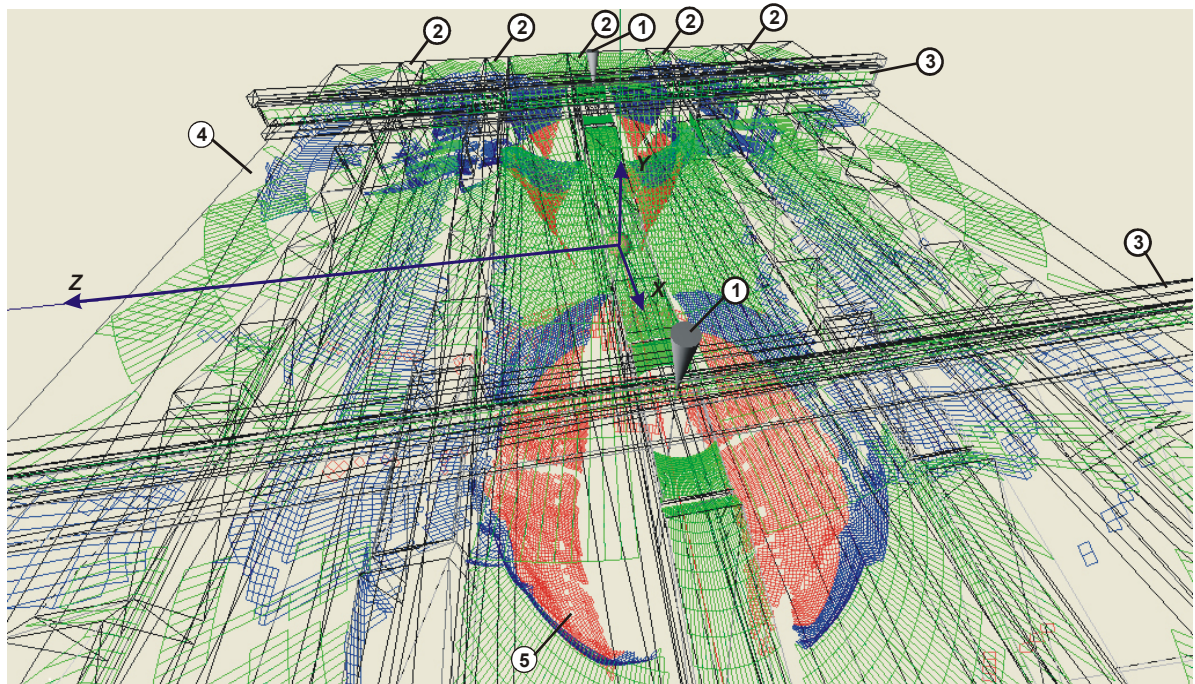


Рисунок 3.12 – Приклад поширення фронту взаємодії в елементах залізничної колії: 1 – прикладені сили; 2 – шпали; 3 – рейки; 4 – баласт; червоним – перевага вертикального напрямку поширення, синім – горизонтального напрямку (див. пояснення до рис. 3.10), зеленим – переродження на поверхневу хвилю

3.3 Формування рівнянь динамічної рівноваги напруженого стану об'єктів

3.3.1 Загальні положення

Визначимо рівняння динамічної рівноваги напруженого стану об'єкту базуючись на положеннях динамічних задач теорії пружності. Для отримання початкових загальних викладок розглянемо розрахунок напружень в одномірній системі координат – в стержні, як в об'єкті найпростішої форми. Крім того, така форма дає змогу розглядати тільки поздовжнє поширення пружної хвилі, вважаючи, що у тонкому стержні поперечною складовою можна нехтувати. За основу взята методика описана Г. Кольським [94].

На протязі стержня визначимо елемент елементарної довжини δx , рис. 3.13.

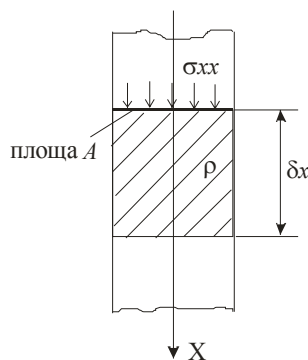


Рисунок 3.13 – Розрахунковий елемент по довжині стержня

Вирішення задачі базується на використанні законів теорії пружності [79]. На стінку елемента діють рівномірно розподілені напруження σ_{xx} . Стінка має площу A . Тоді напруження, які виникнуть на протилежній стінці елемента при проходженні по ньому пружній хвилі

$$\delta_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta x, \quad (3.19)$$

де $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}$ – зміна напружень по довжині елементу.

Відповідно до другого закону Ньютона, виразивши масу через об'єм і щільність, можна записати рівняння

$$\rho A \delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = A \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta x, \quad (3.20)$$

де u – абсолютна деформація елемента.

Після вилучення із сторін рівняння однакових величин формула (3.20) прийме вид

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}, \quad (3.21)$$

Напруження можна виразити через модуль пружності E

$$\sigma_{xx} = E \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3.22)$$

де $\frac{\partial u}{\partial x}$ – відносна деформація елемента.

Підставивши формулу (3.22) до формули (3.21), отримаємо рівняння поширення хвиль повздовж стержня

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (3.23)$$

Таким чином, формули (3.1-3.5) дають геометрію поширення хвилі напружень, яка відокремлює простір, що приймає участь у взаємодії з прикладеною силою, а формули (3.19-3.23) встановлюють динамічну рівновагу даного процесу.

3.3.2 Розрахунок напружень в тілі вільного обрису

Для розрахунків напружень в тілі довільного обрису розглянемо рух хвилі с кроком Δt . На кожному кроці будемо мати фронт поширення – поверхню, що обмежує простір, який вже приймає участь у взаємодії – відповідно до поздовжньої і поперечної швидкостей руху просторової хвилі в середовищі з урахуванням геометричної форми об'єкта

$$(x; y; z) \in \omega_k, \quad (3.24)$$

де ω_k – множина точок, які належать даному (k -му) об'єкту.

Порушення умови (3.24) при розв'язанні рівнянь (3.5) показуватиме перехід частини векторів, множина яких описує поширення фронту взаємодії,

до наступного об'єкту (або вихід у повітря), що буде потребувати зміни характеристик поширення у відповідності до фізичних властивостей нового об'єкту.

Будемо поділяти об'єкт на сегменти обмежені поверхнями суміжних кроків руху фронту поширення. Перехід від одної поверхні до наступної відбувається через множину векторів. Приклад такого сегменту, обмеженими суміжними поверхнями, можна спостерігати на рис. 3.4.

Розглянемо i -й сегмент, обмежений двома поверхнями фронту поширення, рис. 3.14. Введемо низку позначень: σ_{i-1} , σ_i – напруження, що діють на попередню і наступну стінку сегменту; S_{i-1} і S_i – площа попередньої і наступної стінки сегменту відповідно; u_i – амплітуда коливань часток речовину об'єкту в межах сегменту; m_i – маса сегменту, визначається виходячи з об'єму, обмеженого поверхнями, і щільності речовини; Δy – відстань між стінками сегменту по осі дії сили.

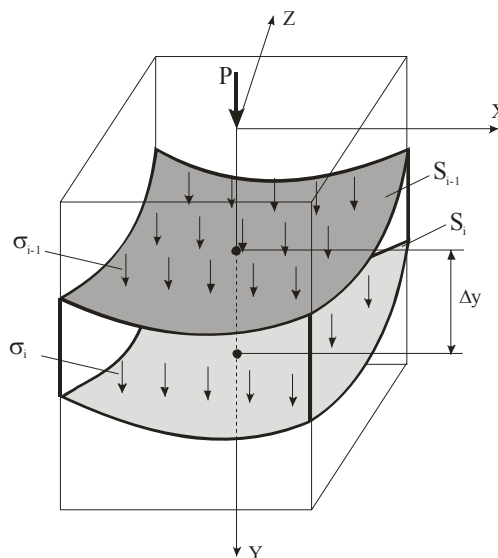


Рисунок 3.14 – Поділення об'єкту на сегменти, як простори між суміжними обрисами фронтів поширення

Такі показники як маса, площі, відстані визначаються виходячи з геометрії поширення множини векторів, тому будемо вважати їх відомими:

$$\left. \begin{aligned} S_{i-1} &= B_i \cap B_{i-1}; \\ m_i &= \rho_i B_i; \\ B_i &= A(t) \setminus A(t - \Delta t) \end{aligned} \right\}, \quad (3.24a)$$

де $A(t)$ – поверхня, що визначає обрис фронту взаємодії на час t ;

B_i – простір, обмежений обрисом i -го сегменту, див. рис. 3.14.

Тоді, аналогічно до формули (3.20)

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sigma_{i-1} S_{i-1} - \sigma_i S_i, \quad (3.25)$$

Формула (3.25) показує, що різниця потенціалів напружень на суміжних стінках сегменту урівноважується коливаннями маси часток речовини з прискоренням.

Під коливаннями часток речовини u_i будемо розуміти процес стискання-розтягування речовини під дією прикладеної зовнішньої сили. Спочатку від дії зовнішньої сили стискається перший сегмент об'єкту ($u_1 \gg 0; \frac{d^2 u_1}{dt^2} > 0$). Потім він починає розправлятися за рахунок передачі тиску на другий сегмент ($u_1 > 0; u_2 \gg 0; \frac{d^2 u_1}{dt^2} < 0; \frac{d^2 u_2}{dt^2} > 0$) і т.д. У результаті в кожному сегменті відбуваються коливання, наслідком яких є перерозподіл напружень у тілі об'єкта для компенсації дії зовнішнього навантаження з мінімумом енергетичних витрат. Якщо зовнішня сила діяла миттєво (удар), то з часом буде відбуватися затухання коливань і пружних деформацій ($\frac{d^2 u_i}{dt^2} = 0; u_i = 0$). Якщо зовнішня сила має постійне значення, то з часом буде спостерігатися затухання коливань, а пружні деформації будуть мати постійні значення, які відповідають випадку стискання об'єкта в статиці ($\frac{d^2 u_i}{dt^2} \rightarrow 0; u_i = const$).

Будемо вважати, що прискорення часток речовини під час цих коливань визначають тільки поздовжні переміщення, а поперечні коливання виникають за рахунок збільшення (зменшення) відставні між частками

речовини під час поздовжніх рухів, рис. 3.15. Тоді, у строго поздовжньому напрямку ми будемо мати пружну деформацію стискання-розтягування, а у строго поперченому – чистий зсув, що підпадає під загальні поняття теорії пружності і пояснює різницю у швидкостях поширення і модулях пружності у різних напрямках для однорідного тіла [79]. У вільному напрямку (проміжному між поздовжнім і поперечним) будемо мати поєднання стискання-розтягування і зсуву, і, як наслідок, векторну суму швидкостей поширення.

Слід зазначити, що швидкість цих коливань ($\dot{u} = \frac{du}{dt}$) звісно не є швидкістю поширення просторової хвилі. Швидкість коливань буде визначатися їх прискоренням, яке в свою чергу залежить не тільки від властивостей речовини, а і від прикладеної сили, постійно змінює своє значення і навіть знак (напрямок). Швидкість поширення просторової хвилі (C) залежить тільки від властивостей матеріалу і є постійною.

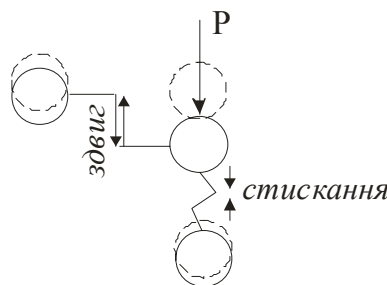


Рисунок 3.15 – Стискаючі та зсуваючі деформації речовини як переміщення елементарних часток

Напруження, що входять у формулу (3.25), не є постійними по всій площі стінки (на відміну від стержня на рис. 3.13), а тому потрібно визначити закон розподілу напружень по поверхні сегменту. В різних точках поверхні сегменту будуть виникати різні напруження. Під напруженнями σ_α будемо мати на увазі такі, що діють по горизонтальній площадці за напрямком α , рис. 3.16. Поодиноким випадком таких напружень будуть напруження σ_0 , напрямки яких співпадає з напрямком дії прикладеного навантаження.

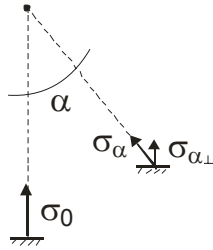


Рисунок 3.16 – Напруження, які діють по горизонтальній площадці за напрямком α

Для подальших дій потрібно мати функцію (алгоритм) приведення напружень для будь-якого місця сегменту до напружень, які співпадають з напрямком дії сили (σ_0), рис. 3.17.

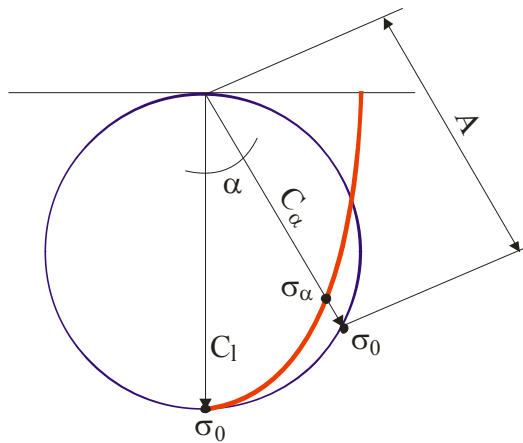


Рисунок 3.17 – Визначення функції розподілу напружень по обрису еліпсоїда

Виходячи з положень вирішення задачі Буссинеска, які викладені в багатьох джерелах, наприклад, [79], відповідно до рис. 3.17 можна записати

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{k}{A^2}; \\ A &= C_l t \cos \alpha; \\ \sigma_\alpha &= \frac{k}{C_\alpha^2 t^2} \end{aligned} \right\}, \quad (3.26)$$

де k – допоміжний коефіцієнт пропорційності.

Поеднавши вирази (3.26), можна отримати залежність

$$\sigma_\alpha = \sigma_0 \frac{C_l^2 \cos^2 \alpha}{C_\alpha^2}, \quad (3.27)$$

яка (при постійних значеннях швидкості поширення) не залежить від параметра часу.

Можна отримати деяке спрощення формул, якщо виразити швидкість за одним напрямком через іншу

$$C_t = \varphi C_l. \quad (3.28)$$

Тоді, виходячи з (3.28)

$$\varphi = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}. \quad (3.29)$$

В остаточному вигляді формулу (3.27) можна записати у вигляді

$$\sigma_\alpha = \sigma_0 \xi \cos^2 \alpha, \quad (3.30)$$

де

$$\xi = \frac{\varphi^2 - \varphi^2 \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\varphi^2}. \quad (3.31)$$

Таким чином, функцію розподілу напружень по поверхні сегменту отримано у вигляді рівняння (3.30), а її чисельні значення залежать тільки від виду речовини (через коефіцієнт Пуассона).

Визначаючи напруження, крім їх значень, необхідно чітко вказувати напрямки дії і положення площадки (для напружень в точці – умовної), по якій вони діють. Для більшості задач напружено-деформованого стану залізничної колії, коли йде мова про напруження на якійсь глибині, мають на увазі нормальні напруження, що діють по горизонтальній площадці. Тому для подальших обчислень необхідно навести співвідношення між різними видами напружень.

При виконанні практичних розрахунків простір кожного сегменту буде поділено на окремі елементи відповідно до кутових кроків (параметри α і γ у виразі (3.5)). Кожен елемент буде визначатися як простір, обмежений чотирма суміжними векторами, рис. 3.18. За геометрією векторів визначаються такі параметри елемента як кут нахилу площадки та площа площадки, на яку діють напруження, об'єм тощо.

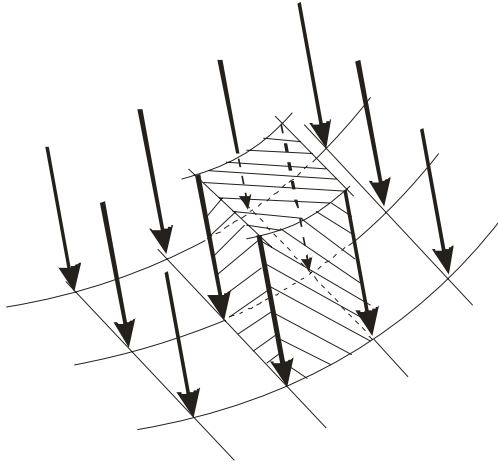


Рисунок 3.18 – Елемент сегменту, як простір, обмежений чотирма суміжними векторами

Розглянемо напруження, що діють в елементі сегменту на умовній площадці, перпендикулярній до напрямку α , рис. 3.19.

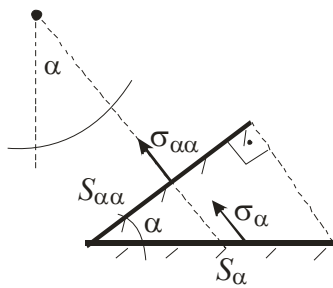


Рисунок 3.19 – Напруження, які діють за напрямком α по різним площадкам

Виходячи із збереження потенціалу дії напружень

$$\sigma_{\alpha\alpha} S_{\alpha\alpha} = \sigma_{\alpha} S_{\alpha} . \quad (3.32)$$

де $\sigma_{\alpha\alpha}$, S_{α} , $S_{\alpha\alpha}$ – напруження і площини, показані на рис. 3.19.

Тоді, враховуючи що $S_{\alpha} = \frac{S_{\alpha\alpha}}{\cos \alpha}$, маємо

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha\alpha} \cos \alpha . \quad (3.33)$$

Розташування елементів в сегменті відбувається по обрису подібного до еліпсу, тому, на відміну від розташування по колу (див. рис. 3.17) площадка $S_{\alpha\alpha}$, розташована під кутом α до площадки S_{α} , не є перпендикулярною до напрямку α . Потрібна для розрахунків площадка, яка

б була перпендикулярна до напрямку α , буде повернута відносно горизонтального положення на кут β , рис. 3.20.

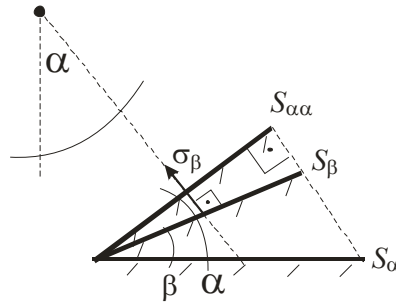


Рисунок 3.20 – Співвідношення потенціалів в елементі на площадках різного розташування

Співвідношення між площами площадок (з рис. 3.20)

$$\left. \begin{aligned} S_{\alpha\alpha} &= S_{\beta} \cos(\alpha - \beta); \\ S_{\alpha} &= S_{\beta} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} \end{aligned} \right\}. \quad (3.34)$$

Використовуючи наведені співвідношення і формулу (3.30), можна записати

$$\sigma_{\beta} = \sigma_0 \xi \cos(\alpha - \beta) \cos \alpha, \quad (3.35)$$

де σ_{β} – повні напруження за напрямком α , які діють на стінку, повернуту на кут β відносно горизонтального положення. Саме потенціал цих напружень у вигляді проекції на вертикальну вісь можна розглядати як реакцію, що урівноважує дію прикладеної сили.

Тоді загальний потенціал по поверхні сегменту, що входить до формули (3.30), можна записати у вигляді

$$\sigma_i S_i = \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} \sigma_0 S_{\beta} \xi \cos(\alpha - \beta) \cos^2 \alpha, \quad (3.36)$$

де сума за зміною кута γ забезпечується залежністю $\beta = f(\vec{v}) = f(\alpha, \gamma)$.

Динамічну рівновагу простору, який деформується між суміжними обрисами фронтів поширення, описує рівняння (3.30). Потенціал по поверхні сегменту буде визначатися як сума потенціалів по кожному елементу, направлених на компенсацію дії прикладеної сили, рис. 3.21.

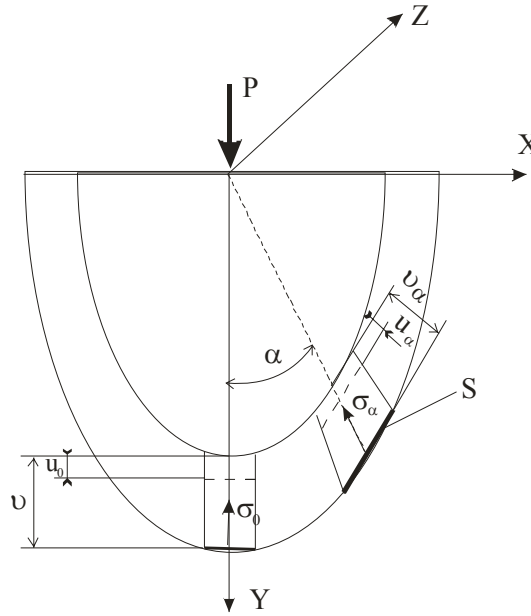


Рисунок 3.21 – Дія напружень на окремий елемент сегменту

Тоді поєднання формул (3.30) і (3.36) дає основне рівняння динамічної рівноваги сегменту

$$\frac{d^2 \sigma_{0(i)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} v_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(i-1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2 (\alpha - \beta) - \sigma_{0(i)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2 (\alpha - \beta) + D_k \frac{d \sigma_{0(i)}}{dt}, \quad (3.37)$$

де D_k – врахування дисипації речовини, в даному випадку цей параметр унеможливорює виникнення надшвидких деформацій (течі речовини).

Для об'єкта в цілому складається система з рівнянь (3.37), кількість рівнянь буде відповідати кількості сегментів, на які поділяється об'єкт. З кожним часовим кроком розрахунку буде додаватися ще один сегмент і, відповідно, ще одне рівняння.

Результатом розв'язання такої системи рівнянь будуть значення напружень σ_{0i} для кожного сегменту об'єкту (системи об'єктів) на розрахункову мить часу. Це дає можливість, використовуючи встановлені вище залежності, визначити необхідні характеристики напружено-деформованого стану.

Тоді вертикальні (нормальні) напруження, що діють по горизонтальній площадці (див. рис. 3.16)

$$\sigma_{\alpha(\perp)} = \sigma_0 \xi \cos^3 \alpha, \quad (3.38)$$

вертикальна абсолютна деформація

$$u_\alpha = \frac{\sigma_0 \xi \nu_\alpha \cos^4 \alpha}{E_\alpha}, \quad (3.39)$$

Отримані формули динамічної рівноваги можуть бути використані для вирішення різних задач теорії пружності, у тому числі й статичних при відповідному виключенні фактору часу. Наприклад, можна отримати рішення задачі визначення напружень на заданій глибині шару.

Розглянемо дію напружень в заданій точці в товщі шару, як показано на рис. 3.2. Прийнемо, що поверхня перерізу в просторі складається з окремих кілець (рис. 3.22), радіус яких збільшується до поверхні

$$r = C_\alpha t \sin \alpha, \quad (3.40)$$

де α – кут, що визначає положення точки на поверхні перерізу, для повного кільця $\alpha \in [0; \pi/2]$;

C_α – швидкість хвилі у напрямку α ;

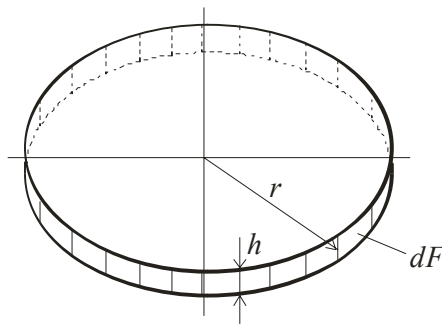


Рисунок 3.22 – Простір кільця дії напружень однакового значення

Площа такого кільця буде визначатися за виразом

$$dF(\alpha) = 2\pi r h, \quad (3.41)$$

де h – умовна товщина кільця, $h = d\alpha C_\alpha t$;

тоді в остаточному вигляді

$$dF(\alpha) = 2\pi C_\alpha^2 t^2 \sin \alpha d\alpha, \quad (3.42)$$

По поверхні розрахункового перерізу будуть діяти напруження і виникати деформації, як реакція на зовнішню силу. Якщо в загальному вигляді говорити про повні напруження σ_α , спрямовані до точки прикладання сили, то, для системи, що знаходиться у стані статичної рівноваги під дією зосередженої сили P , повинно виконуватися рівняння

$$P = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_\alpha \cos \alpha dF(\alpha), \quad (3.43)$$

або, використовуючи формули (3.27) і (3.42),

$$P = 2\pi C_l^2 t^2 \sigma_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \alpha \sin \alpha d\alpha, \quad (3.44)$$

Враховуючи, що $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{3}$ і позначивши розрахункову

глибину як $y = C_l t$, отримаємо рішення у вигляді формули Буссінеска

$$\sigma_0 = \frac{3P}{2\pi y^2}. \quad (3.45)$$

Формула (3.45) може бути використана для знаходження нормальних напружень від зосередженої сили не тільки по осі дії сили, а й для будь якої точки в просторі об'єкту, враховуючи, що коло з діаметром y , розташоване як на рис. 3.17, буде створювати ізолінію для напружень σ_0 .

3.3.3 Перерозподіл напружень при контакті суміжних об'єктів

Зміна напружень в межах одного об'єкту підпорядкована системі з рівнянь виду (3.37). Кожне таке рівняння, що входить в систему, описує передачу тиску з одної стінки сегменту на іншу (див. рис. 3.14), з урахуванням площ, залежності між напруженнями по елементам, з яких складається поверхня сегменту, та інерційного руху мас речовини під час деформації (див. рис. 3.21). Якщо такий перехід відбувається між різними об'єктами, поверхня контакту залучається до розподілення простору

взаємодії на сегменти, рис. 3.22а. Це потребує й відповідних корегувань при формування рівнянь виду (3.37) за правилом (3.36):

$$\begin{cases} \dots \\ \{\sigma_{\omega 1(i)}\} = f(A_{\omega 1}(t - \Delta t), A_{\omega 1}(t) + A'(t)); \\ \{\sigma_{\omega 2(i)}\} = f(A'(t), A_{\omega 2}(t)); \\ \{\sigma_{\omega 1(i+1)}\} = f(A_{\omega 1}(t), A_{\omega 1}(t + \Delta t)); \\ \dots \end{cases}, \quad (3.45a)$$

де $\{\sigma_{(i)}\} = f(A(t - \Delta t), A(t))$ – скорочене представлення рівняння (3.37).

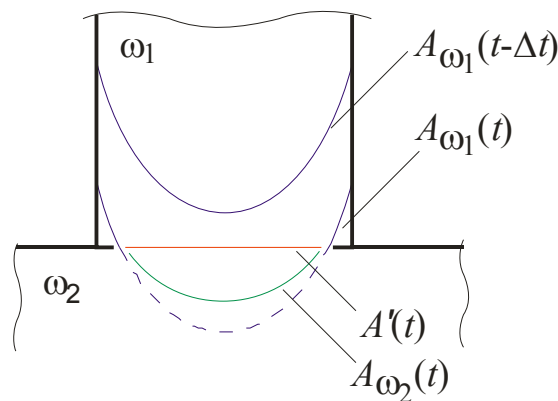


Рисунок 3.22а – Поділення простору на сегменти при контакті двох об’єктів

3.3.4 Поздовжні коливання вигину балки

Наведена в попередньому пункті методика описує коливання стискання-розтягування і призначена для опису роботи об’єктів підрейкової основи (баласт, земляне полотно тощо). Рейка має незначні розміри поперечного перетину у порівнянні з довжиною і опирається на основу, що має суттєво меншу жорсткість у порівнянні з її власною. Такий випадок більш адекватно будуть описувати поздовжні коливання вигину балки, які будуть приводити до її вигину.

За основу візьмемо методику опису коливань балки при проходженні поздовжньої хвилі [94].

Розрахункова схема показана на рис. 3.23 для елементу балки довжиною $\delta x \rightarrow 0$. Балка вигинається під дією згинаючого моменту M , який

змінюється по її довжині. Згинаючий момент повинен урівноважуватися поперечною силою F , яка теж змінюється по довжині балки.

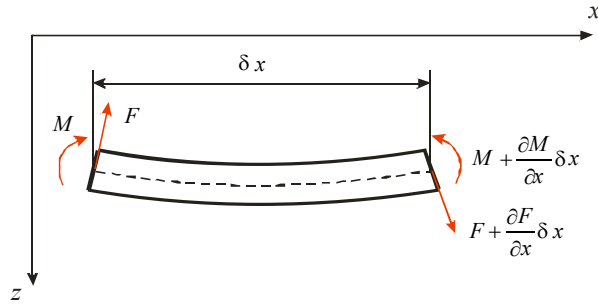


Рисунок 3.23 – Розрахункова схема вигину елементу балки

Рівняння руху балки по осі «у» буде мати вигляд

$$\rho A \delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \delta x, \quad (3.46)$$

де A – площа поперечного перетину; y – переміщення.

Прийmemo умову, що

$$F = -\frac{\partial M}{\partial x} \delta x \rightarrow 0. \quad (3.47)$$

Тоді рівняння рівноваги моментів відносно середини елементу балки δx буде мати вигляд

$$M - \left(M + \frac{\partial M}{\partial x} \delta x \right) + F \frac{\delta x}{2} + \left(F + \frac{\partial F}{\partial x} \delta x \right) \frac{\delta x}{2} = 0, \quad (3.48)$$

після скорочень

$$\frac{\partial M}{\partial x} \delta x + \left(2F + \frac{\partial F}{\partial x} \delta x \right) \frac{\delta x}{2} = 0, \quad (3.49)$$

Прийmemo наступні умови

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{EI}{R} \\ \frac{1}{R} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{\partial y \rightarrow 0} \end{aligned} \right\}, \quad (3.50)$$

де R – радіус кривизни нейтральної осі (класично балка представлена як сукупність паралельних волокон, в один бік від нейтральної вісі вони розтягуються, в інший – стискаються).

Перетворимо (3.47), використовуючи (3.50)

$$F = -\frac{\partial M}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{EI}{R} \right) = -\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} EI. \quad (3.51)$$

Виходячи з (3.46) і (3.51),

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}. \quad (3.52)$$

Якщо врахувати, що балка знаходиться у просторі, який має модуль пружності U (рейка спирається на пружну основу) [22, 24], рівняння (3.52) прийме вигляд

$$\rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} - Uz. \quad (3.53)$$

Рішення цього диференційного рівняння будемо шукати у вигляді

$$y = f_1(x) f_2(t). \quad (3.54)$$

Тоді функції $f_1(x)$ і $f_2(t)$ повинні задовольняти умовам

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^4 f_1}{\partial x^4} &= C_1 f_1(x); \\ \frac{\partial^2 f_2}{\partial t^2} &= -\frac{EIC_1 + U}{\rho A} f_2(t) \end{aligned} \right\}. \quad (3.55)$$

Функція $f_1(x)$ відображає статичний прогин балки по довжині і її рішення для рейки відомо [20, 22]

$$f_1(x) = B e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (3.56)$$

де k – коефіцієнт відносної жорсткості;

$$B = \frac{Pk}{2U}. \quad (3.57)$$

Тоді, виходячи з (3.55),

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -4Bk^4; \\ f_2(t) &= C_2 \sin pt + C_3 \cos pt; \\ p &= \sqrt{\frac{2U}{\rho A}}. \end{aligned} \right\}. \quad (3.58)$$

Коефіцієнти C_2 і C_3 можуть бути визначені виходячи з граничних умов, які, у тому числі, повинні враховувати дисперсію коливань по довжині

балки [94]. Для практичних розрахунків розв'язання рівняння (3.54) будемо шукати із умови взаємного прогину рейки (y_p), яка опирається на опори, і прогину підрейкової основи в місцях опор ($y_{оп}$) від сил, що передаються на ці опори від рейки ($Q_{оп}$)

$$\left. \begin{aligned} y_p(x, t) &= y_{оп}(x, t); \\ y_{оп} &= f(Q_{оп}); \\ Q_{оп} &\sim \frac{d^4 y_p}{dx^4}. \end{aligned} \right\}. \quad (3.59)$$

Прогин підрейкової основи визначається як сума деформацій сегментів всіх шарів за відповідними координатами, визначені за розв'язанням системи з рівнянь виду (3.37).

Отримані рівняння і залежності було покладено в основу при створенні комп'ютерної програми для розрахунків за просторовою моделлю динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, яка була використана для вирішення низки задач [124-126].

3.4 Моделювання напружено-деформованого стану ділянки залізничної колії як системи об'єктів

3.4.1 Загальна розрахункова схема і система рівнянь

Залізнична колія представляється як набір об'єктів $\omega_i \in \Omega$, рис. 3.24. Протяжність ділянки і, відповідно кількість об'єктів, залежить від задачі, що вирішується. Для більшості подальших розрахунків розглядалася ділянка з 15-20 шпал. Цього достатньо, щоб для перерізу, розташованого посередині ділянки, отримати повний цикл навантаження: від відсутності тиску колеса, яке знаходиться ще на достатній відстані, до затухання тиску після проїзду колеса на достатню відстань.

Сили від рухомого складу прикладаються до рейки, яка працює на вигін, підпорядкований рівнянням (3.54), (3.56). Від прогину рейки тиск передається через підкладки на шпали і далі. В об'єктах підрейкової основи

виникають напруження, зона поширення яких поширюється в часі у відповідності до рівняння (3.1). Зона дії напружень обмежується поверхнею, що визначається множиною векторів, положення яких визначають рівняння (3.5). З кожним часовим кроком зона дії напружень збільшується, поділяючи підрейкову основу на умовні сегменти. Кожен такий сегмент поділяється на окремі елементи – простір обмежений чотирма суміжними векторами. Сумарні дані по кожному об'єкту складають інформацію про напружений стан сегмента. Процес деформації сегмента в часі підпорядкований рівнянню (3.37). Розв'язання системи з таких рівнянь визначає напруження (деформації) будь-якої точки підрейкового простору. Якщо при розв'язанні рівнянь (3.5) з'ясовується що вектор переходить за межі даного об'єкту (переходить до наступного), його параметри корегуються.

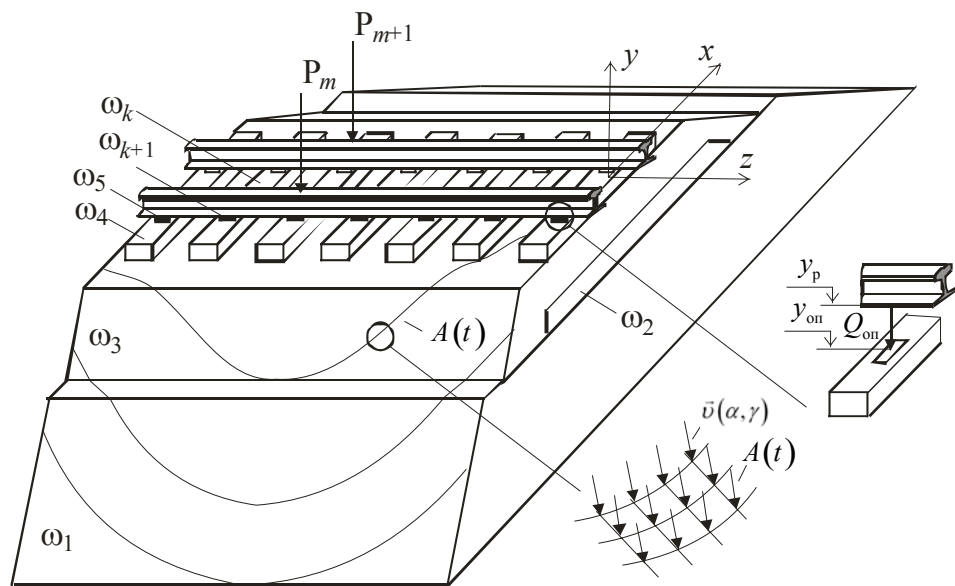


Рисунок 3.24 – Розрахункова схема для просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності

Враховуючи наведені вище принципи, співвідношення і залежності, остаточно розроблену математичну модель для системи об'єктів, які складають залізну колію (у відповідності до рис. 3.24) можна представити у наступному виді:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d^2 \sigma_{0(1)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = f(P_m, Q_{\text{on}}) - \sigma_{0(1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(1)}}{dt}; \\
\frac{d^2 \sigma_{0(2)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \sigma_{0(2)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(2)}}{dt}; \\
\ldots \\
\frac{d^2 \sigma_{0(i)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(i-1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \sigma_{0(i)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(i)}}{dt}; \\
\ldots \\
\frac{d^2 \sigma_{0(n)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(n-1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \sigma_{0(n)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(n)}}{dt}
\end{array} \right. \quad (3.60)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
S_{i-1} = B_i \cap B_{i-1}; \\
B_i = A(t) \setminus A(t - \Delta t); \\
A(t) = \{\forall \vec{\nu} \in \omega_k\}; \\
\vec{\nu} = \Delta t C_{\alpha}; \\
C_{\alpha} = \frac{C_t C_l}{\sqrt{C_t^2 \cos^2 \alpha + C_l^2 \sin^2 \alpha}}; \\
\beta = f(\vec{\nu})
\end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l}
y_p(z, t) = y_{\text{on}}(z, t); \\
y_{\text{on}} = f(Q_{\text{on}}, \sigma_{\alpha, \gamma} : (\alpha, \gamma) \equiv z); \\
Q_{\text{on}} \sim \frac{d^4 y_p}{dz^4}.
\end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l}
\alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]; \\
\gamma \in [0; 2\pi]; \\
n = \frac{t}{\Delta t}; \\
\Omega = \{\omega_k\}
\end{array} \right\}$$

3.4.2 Моделювання руху зовнішнього навантаження

Основну частину розробленої моделі складає опис напружено-деформованого стану підрейкової основи, до якої прикладаються сили, що діють на опори від прогину рейки. Ці сили не є безпосередньо вихідними даними зовнішнього навантаження (хоча модель не містить принципових заперечень й такого варіанту використання, якщо це відповідає задачі, що розв'язується), а визначаються в процесі моделювання, як ланка, що пов'язує прогин рейки і деформацію підрейкової основи. Тому зміна положення колеса по довжині рейки не приводить безпосередньо до зміни координат прикладання сил на підрейкову основу, а перерозподіляє тиск на нерухомі опори. Звісно, з часом руху колеса в системі будуть «додаватися» нові навантаженні опори і відповідно «вилучатися» розвантажені. Схематично такий процес наведено на рис. 3.24а. Основна система диференціальних рівнянь, наведена в алгоритмі (3.60) визначає напружено-деформований стан підрейкової основи від тиску на одну опору. Як правило, одночасно в розрахунку задіяні декілька опор (приблизно від 5 до 11).

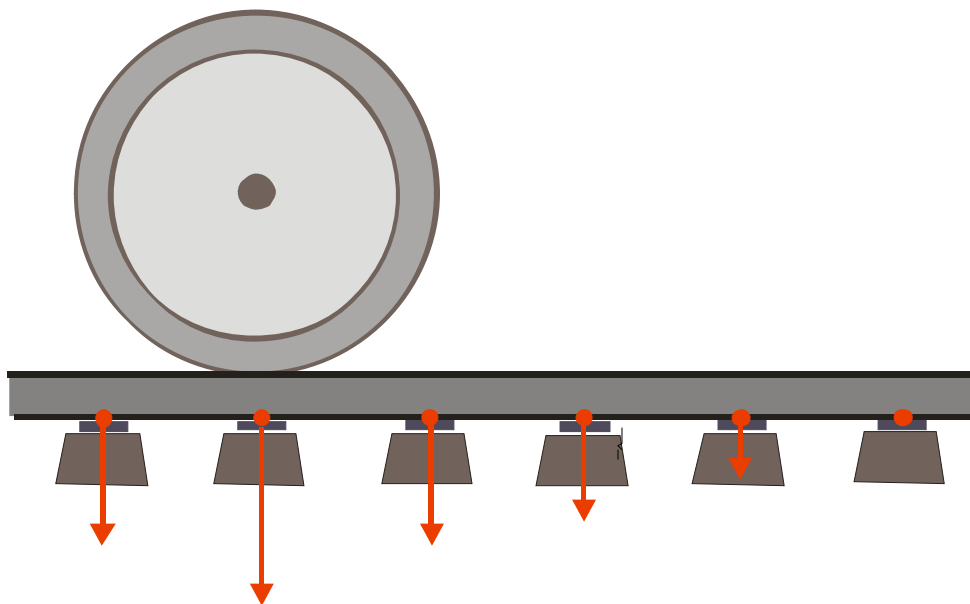


Рисунок 3.24а – Зміна сил тиску від рейки на опори, як відображення руху колеса

3.5 Аналіз числових розрахунків

3.5.1 Розрахунки напружено-деформованого стану окремих об'єктів та їх поєднань

Одним з кроків верифікації розробленої моделі можна вважати можливість розв'язання класичних задач теорії пружності. Розглянемо декілька числових прикладів, які є логічним продовженням розглянутих в попередніх пунктах теоретичних положень.

Першим за різновидом випадком безперечно можна вважати *півпростір, навантажений зосередженою силою*. В моделі таким об'єктом буде зразок речовини форми паралелепіпеду, який відповідає характеристикам ґрунту, що може використовуватися для спорудження залізничної ділянки. Для числового прикладу приймемо ґрунт з модулем деформації 40 МПа, щільністю 1400 кг/м³, коефіцієнтом Пуассона 0,3. Розмір зразка 6,0х6,0 м висотою 9 м. Такого розміру достатньо, щоб отримати стабільні показники напружень і деформацій в межах кроків розрахунків до виходу фронту виникнення напружень за геометричні межі зразка. Зовнішня зосереджена сила, прикладена к центру поверхні зразка дорівнює 1 кН.

Для отримання результатів за класичними рішеннями теорії пружності можна скористатися відомою формулою Буссінеска (див. ф. 3.45)). Відстань (y) в цій формулі є діаметром умовного кола, яке утворює ізолінія напружень.

На рис. 3.25 наведена зміна напружень від глибини по осі дії сили, отримана за результатами моделювання і за розрахунками за формулою (3.45). Результати розрахунків співпали майже повністю (різниця значень не перевищує 1 %). Враховуючи показано вище можливість аналітичного приведення математичного апарату моделі, з урахуванням певних спрощень, до формули (3.45) значна похибка й не мала мати місце. Цей крок верифікації перш за все показує відсутність помилок при практичній реалізації розробленої математичної моделі.

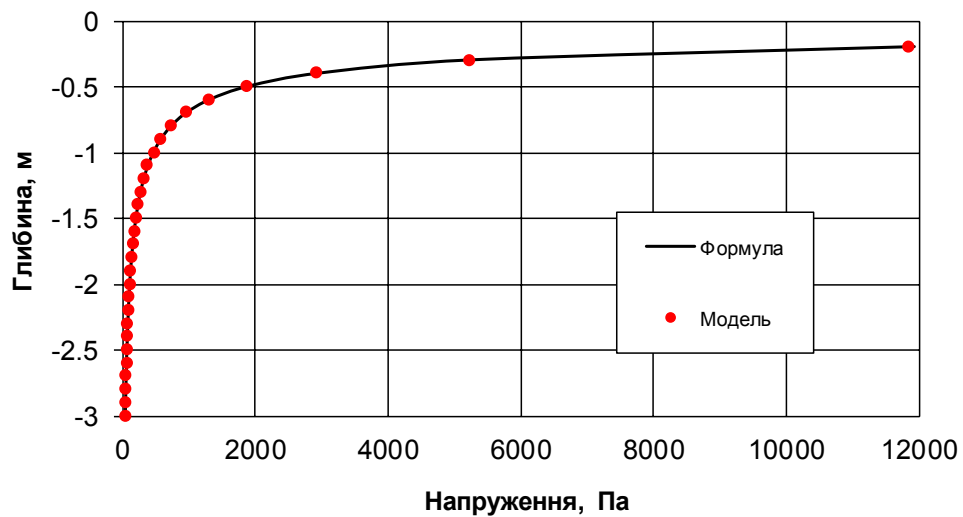


Рисунок 3.25 – Порівняння напружень, отриманих за моделюванням і по ф. (3.45) по осі сили, прикладеною до півпростору

Подібне порівняння виконувалось і на різних відстанях від осі дії сили. На рис. 3.36 наведений приклад для відстані 0,4 м. При наближенні до поверхні півпростору, спостерігаються принципові розходження залежності напружень від глибини, отримані моделюванням і розраховані за формулою (3.45). Вірна форма залежності, отримана при застосуванні розробленої моделі, показує, що вона не піддана так званим ефектам сингулярності.

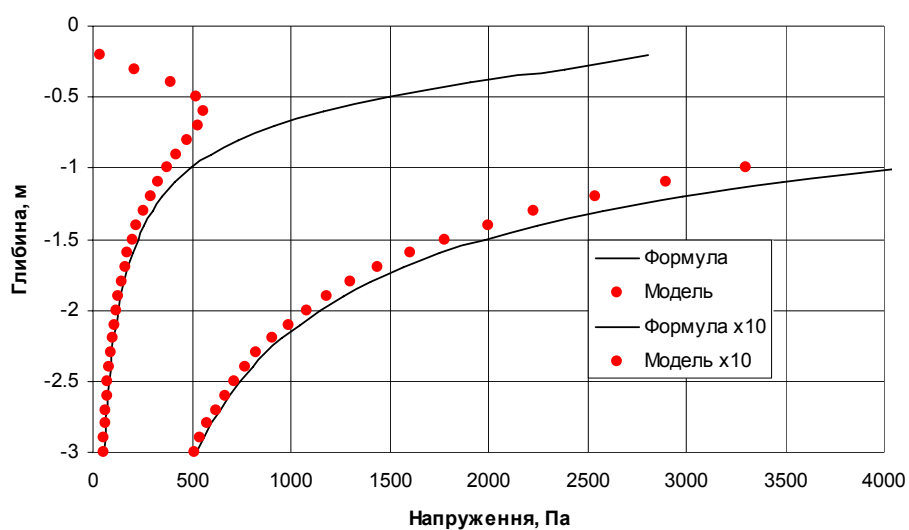


Рисунок 3.26 – Порівняння напружень, отриманих за моделюванням і по ф. (3.45) на відстані 0,4 м від осі сили, прикладеною до півпростору

Деформація зразка може бути розрахована за формулою, відомою з теорії пружності [79]

$$W = \frac{P(1-\mu^2)}{\pi Er}, \quad (3.61)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль деформації речовини;

r – відстань по поверхні від точки прикладання сили.

На рис. 3.27 наведені деформації за результатами моделювання і за розрахунками по формулі (3.61). Принципової різниці в результатах не спостерігається.

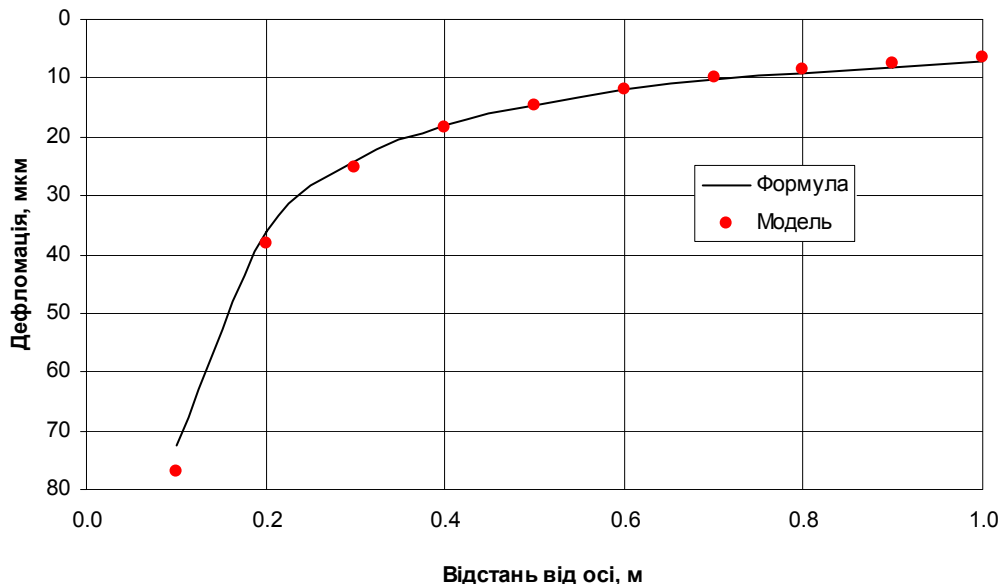


Рисунок 3.27 – Порівняння деформацій, отриманих за моделюванням і по ф. (3.61) на поверхні півпростору

Другим розглянутим об'єктом буде стовпчик ґрунту з невеликими розмірами в перетину у порівнянні з висотою – (0,25х4,0х0,25), тобто *обмежений простір, наближений до задачі стержня* в теорії пружності. Характеристики речовини і прикладеною сили зберігаються з попереднього порівняння. Особливістю даного прикладу є швидке виродження еліпсоїдної форми фронту поширення напружень до плоскої, рис. 3.28.

Таким чином, розрахункове значення напружень по основній довжині стержня може бути визначено як співвідношення сили, до площі перерізу. Для прикладу, що розглядається, воно складатиме 16 кПа. Значення напружень по довжині стержня за результатами моделювання наведені на рис. 3.29.

Після виходу на відстань, достатню у порівнянні з розмірами перерізу, напруження, отримані за результатами моделювання, набувають очікуваного рівня.

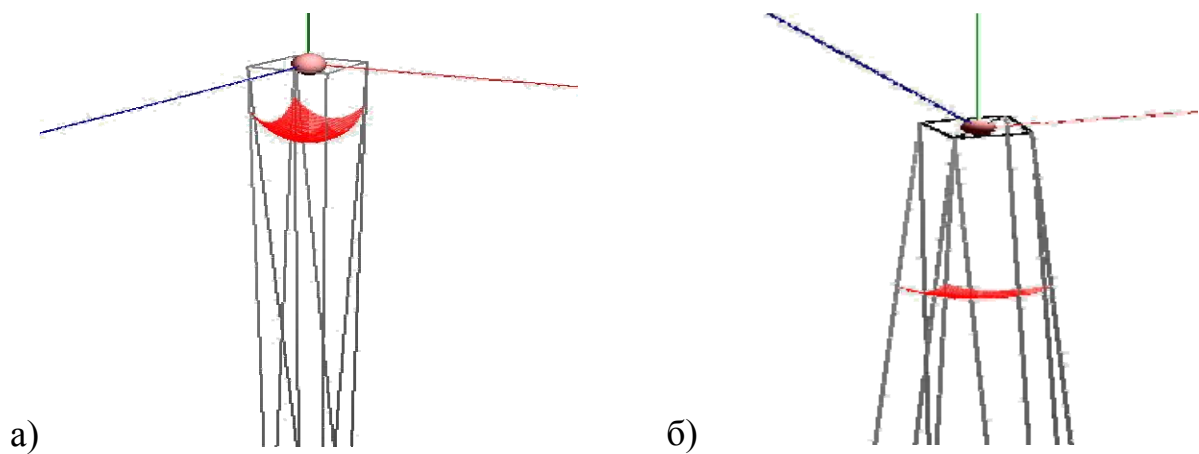


Рисунок 3.28 – Виродження форми фронту поширення напружень в стержні

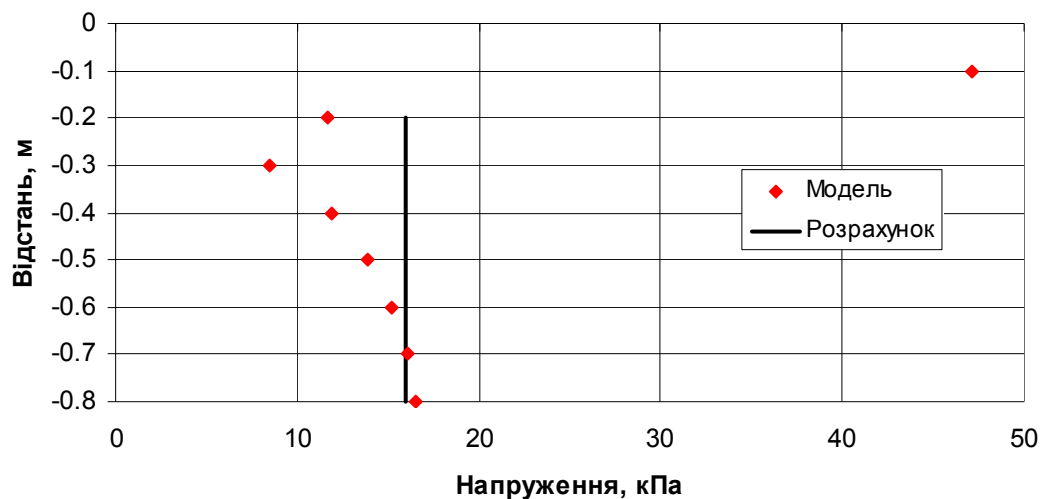


Рисунок 3.29 – Зміна напружень по довжині стержня

Зазвичай, в задачах теорії пружності окрім зосередженого прикладання сили розглядається розподілене навантаження. Привести розроблену модель до плоскою задачі на представляється можливим. Тому розподілене навантаження розглянемо на прикладі штампа у вигляді куба. Для моделювання *навантаження від штампа* буде розглянута система з двох об'єктів: півпростору ґрунту з першого наведеного прикладу і рівносторонній куб відносно невеликого розміру з речовини, що має великі швидкості поширення напружень. Приймаючи розміри куба (0,25x0,25x0,25) і речовину залізобетон, отримаємо штамп наближений до дії залізобетонної шпали (для даного прикладу це не має принципової необхідності).

На рис. 3.30 наведено обриси фронту поширення напружень для різних кроків розрахунку. Їх зміна є показовою для даного сполучення об'єктів: спочатку обрис фронту поширення напружень відповідає формі еліпса (ф. (3.1)) – рис. 3.30а; після низки кроків розрахунку його форма обмежується стінками об'єкта (ф. 3.24), вектори, які вийшли за їх межі залишають точки входу на поверхні наступного об'єкту (візуально відображаються зеленими клітками, які поєднують чотири суміжних вектора) – рис. 3.30б; досягнувши зони контакту об'єктів обрис фронту вироджується до площини – рис. 3.30в; через зону контакту вектори потрапляють до наступного об'єкту (в даному прикладі майже одночасно по всій поверхні контакту), змінюють параметри руху у відповідності до характеристик нового об'єкту і формують в ньому обрис фронту поширення – рис. 3.30г; фронт поширення напружень продовжує поширюватись в новому об'єкті, в тому числі за рахунок відновлення векторів по поверхні – рис. 3.30д-3.30е.

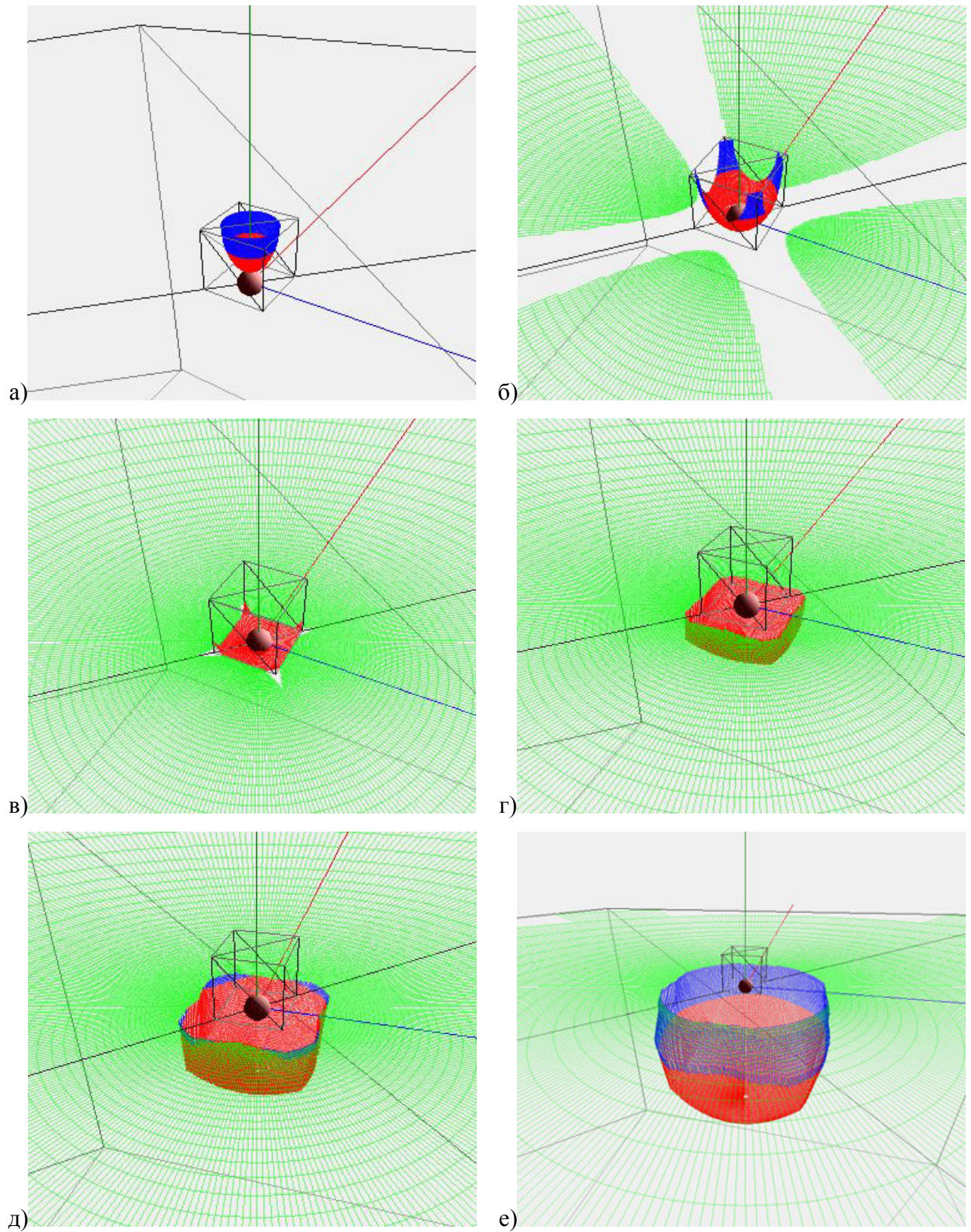


Рисунок 3.30 – Зміна обрису фронту поширення напружень при дії сили на півпростір через штамп

Для такого варіанту розрахунку є досить показовими адекватні обриси розподілення напружень в межах і за межами штампа, які за результатами моделювання показані на рис. 3.31.

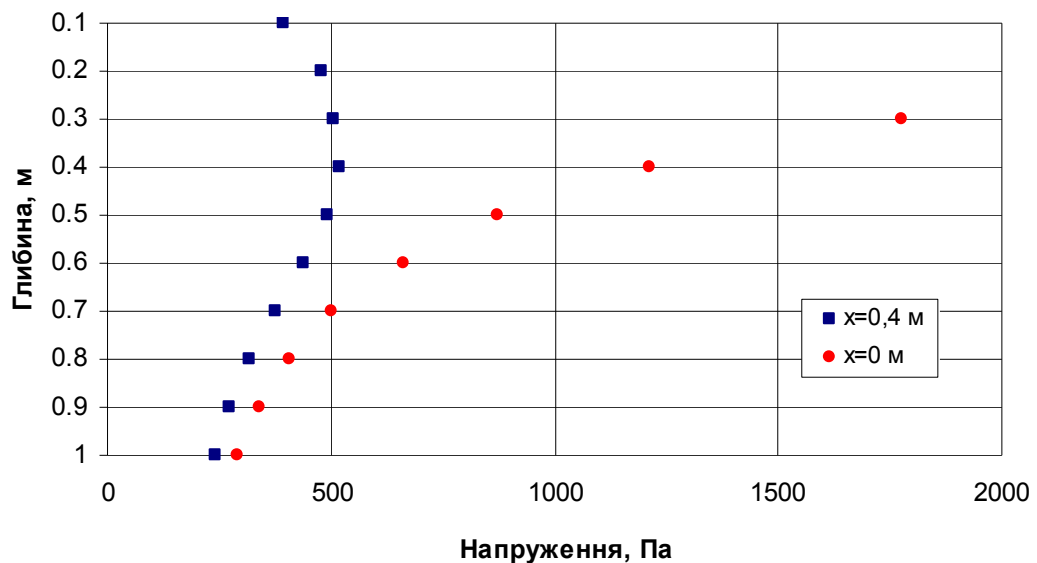


Рисунок 3.31 – Зміна напружень з глибиною по осі і за межами навантаження при дії сили на півпростір через штамп

3.5.2 Розрахунки напружено-деформованого стану ділянки залізничної колії

Розглянемо результати розрахунків напружено-деформованого стану за розробленою моделлю для ділянки залізничної колії в цілому.

Характеристики ділянки: рейки Р65, залізобетонні шпали (17 штук з відстанню між осями 0,54 м, що відповідає епюрі шпал 1840 шт/км), скріплення КБ, баласт щебенекий (модуль деформації 100 МПа) товщиною 0,5 м від підшви шпали, ґрунт з модулем деформації 25 МПа.

На рис. 3.32 показано вигляд моделі підрейкової основи ділянки в процесі підготовки до розрахунків за допомогою спеціального програмного забезпечення, розробленого автором у відповідності до викладеного вище математичному інструменту.

Для можливості тотожного порівняння результатів розрахунків з квазістатичними методами (перш за все за аналітичною методикою, наведеною в Правилах розрахунків залізничної колії на міцність [22]) розглянемо варіант розрахунку з прикладання нерухомої постійної сили 118 кН. При проведенні розрахунків фіксувався обрис деформації підрейкової основи по осям декількох суміжних шпал – в точках сумісного прогину рейки і деформації підрейкової основи. За прогином рейки визначався загальний модуль пружності підрейкової основи. Розрахунок тривав до умовної стабілізації динамічних прогинів на рівні статичних. Зміна обрису фронту поширення в часі і прогину рейки показані на рис. 3.33.

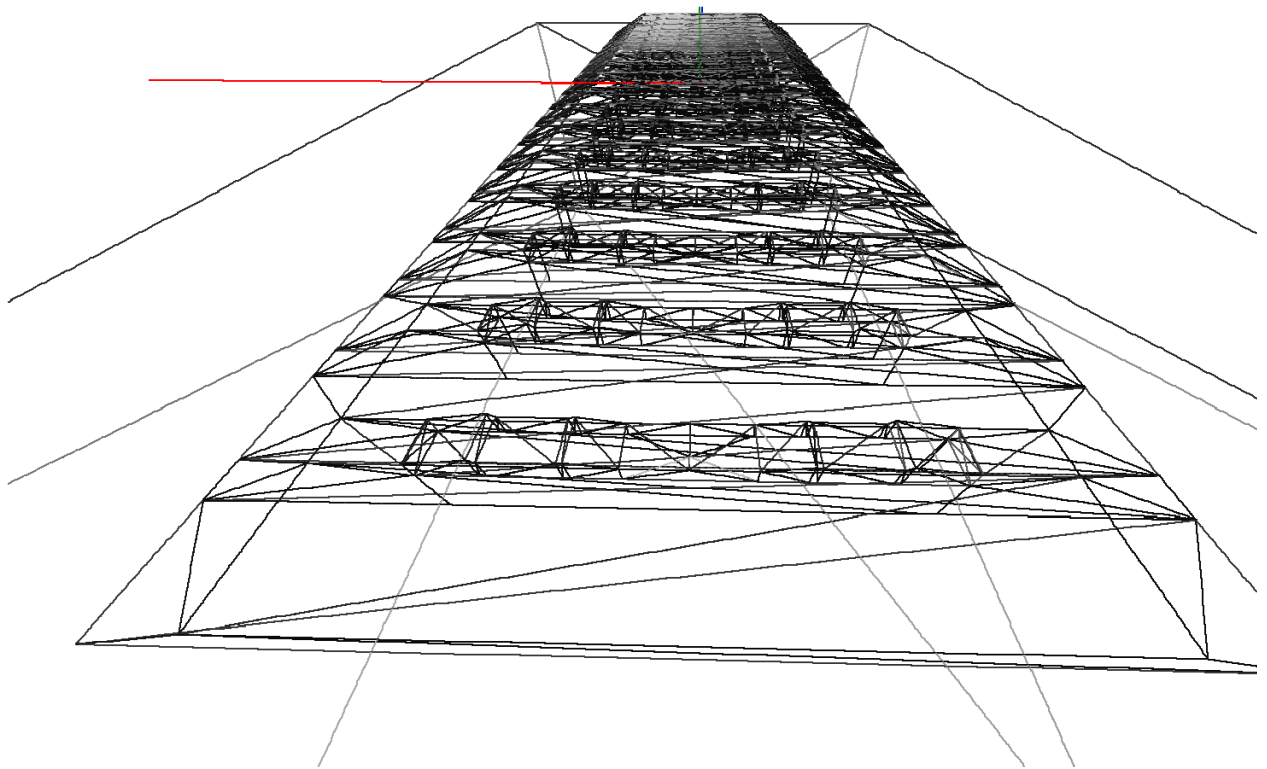


Рисунок 3.32 – Модель підрейкової основи ділянки (17 шпал) в процесі підготовки до розрахунків

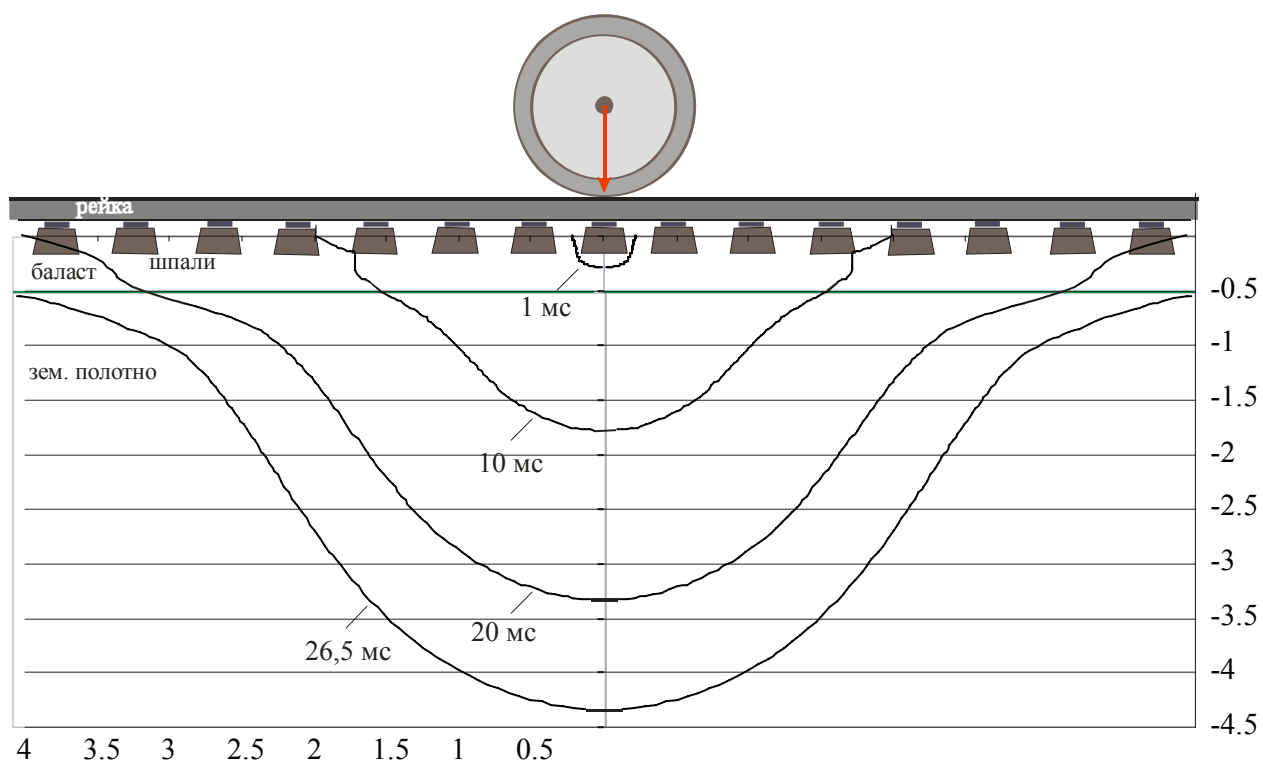


Рисунок 3.33 – Зміна фронту поширення в часі, в побудові плоского графіку (нерухоме прикладання сили)

Показником набуття стабілізації була прийнята умова, за якою наступний крок розрахунку змінював модуль пружності підрейкової основи не більше, ніж на 1 %. На рис. 3.34 наведено такий процес для даного числового прикладу. Докладніше розрахунки для визначення модуля пружності підрейкової основи будуть розглянуті в 5-му розділі даної роботи.

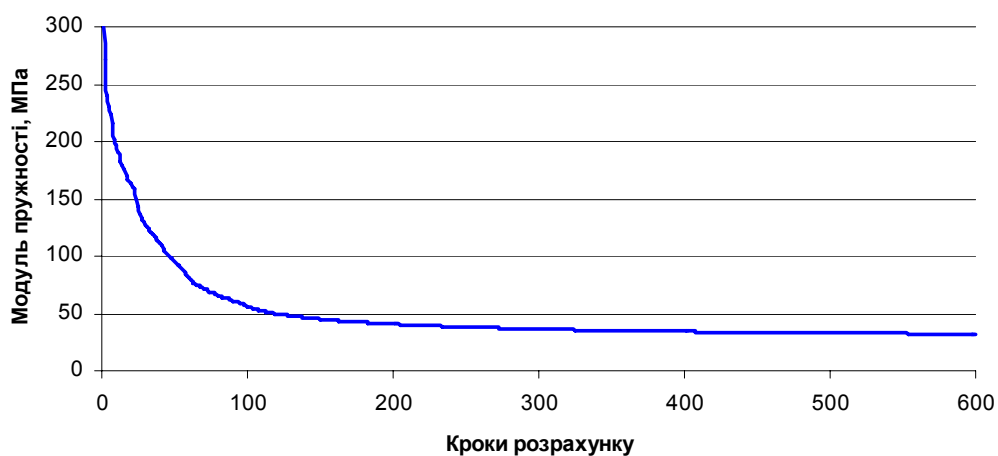


Рисунок 3.34 – Процес поступового формування прогину підрейкової основи при стаціонарному прикладанні сили

Фронт поширення частини простору підрейкової основи, що вже вступив у процес взаємодії, на час забезпечення повного прогину рейки показано на рис. 3.35.

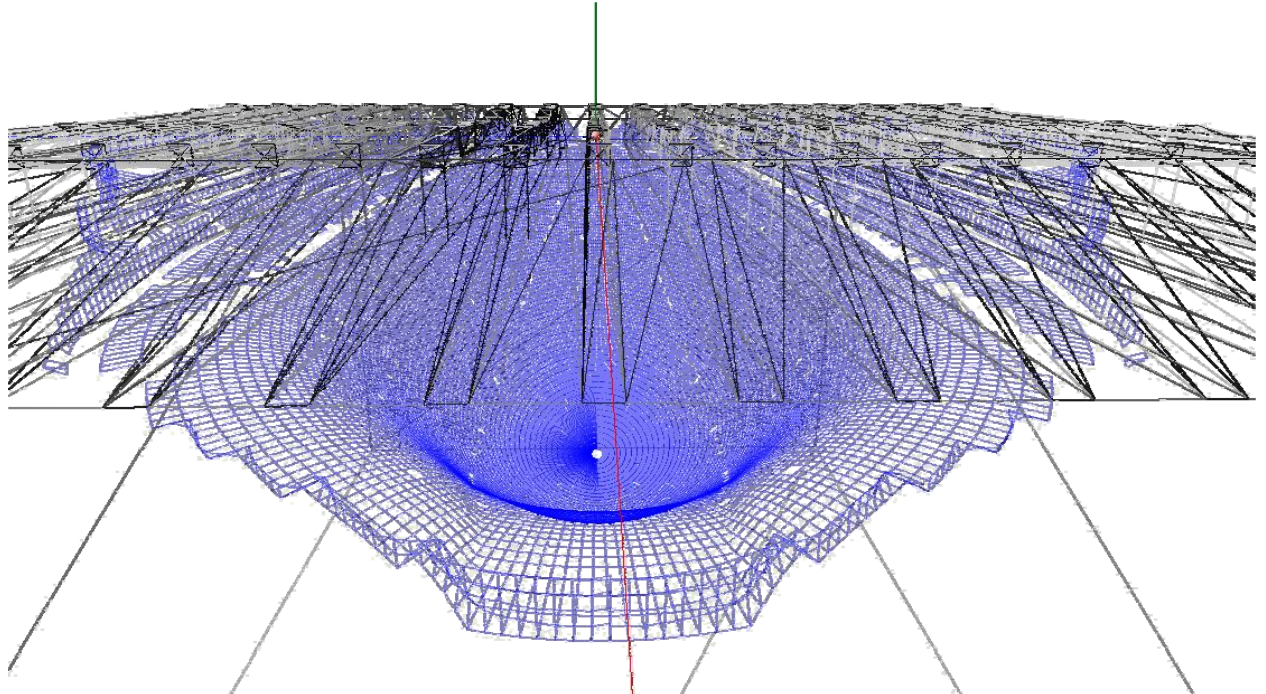


Рисунок 3.35 – Фронт поширення частини простору підрейкової основи, що вже вступила у процес взаємодії, на час забезпечення повного прогину рейки (нерухоме прикладання сили)

Як чисельний результат моделювання, який можна порівняти з розрахунками за ЦП-0117 [22], на рис. 3.36 показані напруження в баласті під шпалою по осі рейки. Розрахункові значення отримані за методикою на основі формул (2.13), (2.14) у відповідності до [22].

Наявність розходжень у значеннях напружень на невеликій глибині пояснюється межами застосування ф. (2.12), яка є основою для аналітичної методики розрахунків [22], – відстань від поверхні прикладання сили повинна бути на менше ширини навантаження. На глибині 35 см, розходження між напруженнями, отриманими за результатами моделювання, і розрахованими складає 11 %, починаючи з глибини 40 см – вже не

перевищує 6 %. Такий результат підтверджує адекватність моделі і на даному кроці перевірок.

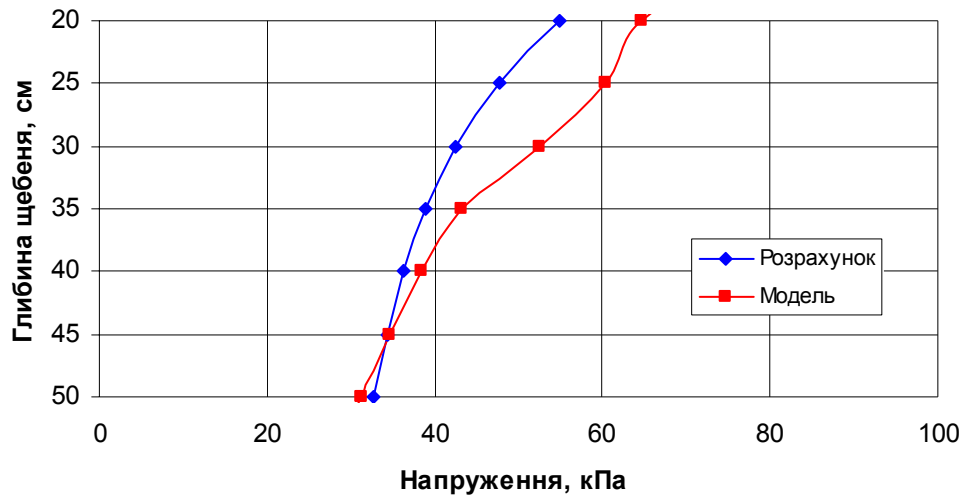


Рисунок 3.36 – Напруження в баласті під шпалою по осі головки рейки

Окрім напружень в баласті, як результати для варіанту, що розглядається, отримано прогини рейки. Слід зупинитися на алгоритмі розрахунку прогину рейки в межах розробленої методики. Результатом розв’язку основної системи рівнянь (3.60) є значення напружень по кожному сегменту, на які поділені об’єкти системи на даному кроці розрахунку. Це дає змогу визначити напруження для кожного елементу, на які поділяється сегмент, що, в свою чергу, дає можливість розрахувати відповідну деформацію (див. п. 3.4). Для розрахунку прогину рейки, визначається переміщення опори під нею, яке складається з сумарної деформації підрейкового простору, розрахованої з певним кроком. Тобто, потрібно мати напруження (а потім деформації) для послідовності точок, положення яких визначається трьома координатами. Як правило в системі відсутні точки (елементи сегментів), які мають «саме такі» координати. Звичайно, є елемент з дуже схожими координатами. При вирішенні задачі знаходження саме напружень в якійсь конкретній точці з заданими координатами (наприклад, в п. 5.1) такою похибкою можна нехтувати, тоді напруження елемента з найближчими координатами і є результатом. Але, коли потрібно знайти

напруження в великій послідовності точок, такі похибки накопичуються і стають відчутними. Тому, для такої задачі, крім елемента, найближчого до потрібних координат, визначається ще один – найближчий за виключенням попереднього і такий, що знаходиться в суміжному сегменті. Результат визначається за апроксимацією напружень між двома визначеними елементами, прийнявши, що напруження змінюються за квадратичною функцією.

Таким чином, для розрахунку прогину рейки повинні бути задіяні дані напруженого стану досить протяжної частини підрейкової простору. Тому гарне співпадання прогинів, визначених при моделюванні, з обрисом прогину рейки, отриманим за методикою ЦП-0117 [22] (див. ф. (2.36)), яке наведено на рис. 3.37, є черговим важливим підтвердженням адекватності розробленої моделі.

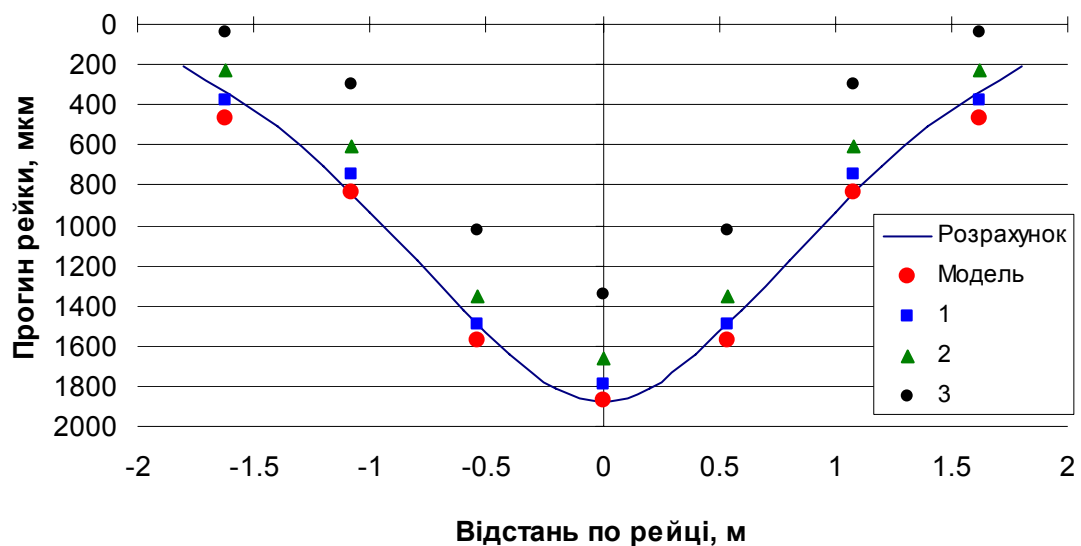


Рисунок 3.37 – Прогини рейки за моделюванням (по опорам) та за аналітичним розрахунком, 1...3 – додатково показані прогини на різних кроках формування деформації підрейкової основи

3.6 Висновки до розділу 3

1. Отримані аналітичні залежності та сформульовано основні положення математичного інструменту для створення моделей напружено-деформованого стану залізничної колії за принципом поєднання рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на дану мить часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації. Отримані рішення таких супутніх при реалізації математичної моделі задач, як аналітичні рівняння обрису поширення фронту взаємодії, опис розширення просторової поверхні через векторну множину, корегування обрису фронту поширення об'єктами обмеженого та півобмеженого простору, корегування фронту поширення при переході з одного об'єкту в наступний з іншими фізичними характеристиками, аналітичні рівняння динамічної рівноваги деформованих зон простору, аналітичні функції розподілу напружень для відокремленої зони простору, принципи передачі тиску від одного об'єкту до наступного через поверхню контакту тощо.

2. Розроблена модель взаємодії колії і рухомого складу, яка, на відміну від існуючих, дає змогу визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків в тому числі для умов швидкісного руху. Адекватність моделі для вирішення поставлених задач підтверджена порівнянням результатів з експериментальними даними та з аналітичними методиками розрахунків при відповідній тотожності розрахункових варіантів.

3. Обґрунтовано адекватність розробленої моделі для вирішення поставлених задач шляхом порівняння отриманих результатів з розрахунками, виконаними за аналітичними формулами теорії пружності для перевірки окремих принципів та складових алгоритмів моделі, і за офіційною методикою «Правил розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» для моделі залізничної ділянки в цілому. Незначні розходження, які мали місце в окремих розрахункових випадках, пояснюються неможливістю повного

ототожнення просторової динамічної моделі з плоскими квазістаціонарними методами.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

4.1 Визначення характеристик жорсткості залізничної колії за результатами вимірів напружень в рейках

В 60...80 роках в ДПТі для натурного виміру модуля пружності застосовувався спеціальний гідравлічний навантажувальний пристрій, змонтований на базі чотиривісного вагона. При цьому сили, що діють на рейку, вимірювалися за допомогою встановлених у головці домкратів силомірів, а прогини рейок – за допомогою електричних прогиномірів. Пристрій дозволяв одержувати безпосередньо графіки залежності прогинів рейок від прикладеної вертикальної сили в кожному циклі навантаження й розвантаження [152, 153].

У теперішній час відбувається пошук сучасного оперативного засобу вимірювання модуля пружності. Існуючі пропозиції, наприклад [154, 155], не знайшли загального практичного застосування. Вони ґрунтувалися на вимірюванні прогинів колії під проїздом поїзда. Основні труднощі виникають від неможливості забезпечити достатню точність вимірювання динамічного прогину – величини яка має невелике значення та швидко змінюється у часі. Також на точність результатів впливає те, що прогинається не тільки безпосередньо рейка, а й її основа, включаючи земляні споруди під залізничною колією.

Колієвипробувальна галузева науково-дослідна лабораторія ДНУЗТ для виконання експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу використовує сучасний тензометричний комплекс «ПОНІЛ-Ц» [138]. Автор дисертації приймав безпосередню участь у розробці пакету комп'ютерних програм для виконання, обробки та аналізу цифрових вимірювань напружено-деформованого стану залізничної колії (свідчення про реєстрацію авторських прав наведені у Додатку К). Застосування для

виміру напружень в рейках цифрового обладнання такого рівня, яке завдяки високій частоті дискретизації вимірювань дає змогу отримувати майже безперервний запис, відкриває можливість визначати модуль пружності за співвідношення напружень в різних перерізах рейки.

Якщо розглядати рейку, що навантажена вертикальною силою від колеса, то, загальновідомо, що напруження будуть виникати в рейці не тільки в місці навантаження, а поширюватися на деяку відстань. Розрахункову схему наведено на рис. 4.1. Причому співвідношення напружень в суміжних точках буде визначатися коефіцієнтом μ :

$$\mu = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \quad (4.1)$$

який, крім відстані між розрахунковими точками (x), залежить тільки від показників жорсткості рейки і підрейкової основи:

$$\mu_i = e^{-kx_i} (\cos kx_i - \sin kx_i), \quad (4.2)$$

де k – коефіцієнт відносної жорсткості:

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}, \quad (4.3)$$

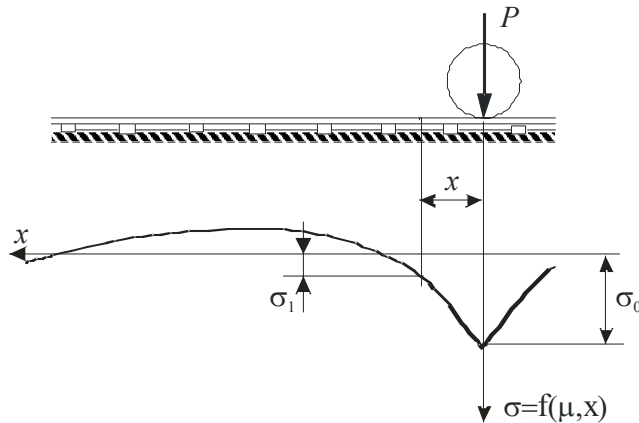


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема визначення коефіцієнта відносної жорсткості за співвідношенням напружень в рейці

Таким чином, для визначення модуля пружності підрейкової основи достатньо знати відношення напружень в рейках в двох перерізах, навіть без розрахунку значення сили, яка спричинила їх появу.

При виконанні натурних вимірювань напружень в рейці від проходження рухомого складу вибиралось три суміжних перерізи, обладнані відповідними датчиками, рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Послідовність трьох перерізів рейки, обладнаних датчиками

Напруження в розрахункових перерізах визначалися автоматизовано за результатами цифрового запису, рис. 4.3. Для зменшення впливу суміжних коліс розглядалися тільки такі варіанти розташування рухомого складу, коли перше колесо першого локомотива заїжджає на перший переріз рейки, або, навпаки, останнє колесо останнього локомотива з'їжджає з останнього перерізу рейки. Коефіцієнт відносної жорсткості розраховувався шляхом апроксимації набору пар значень відношення напружень-відстань за критерієм найменших квадратів функцією (4.2). Такий підхід дає змогу не обмежуватись двома перерізами на рейці. Тоді розрахунок модуля пружності підрейкової основи можна представити у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} U &= 4EI k^4; \\ k &= f(\{\mu_i\}); \\ \exists k : \sum_i \left(\mu_i \sigma_0 - \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^2 &\rightarrow \min. \end{aligned} \right\}. \quad (4.4)$$

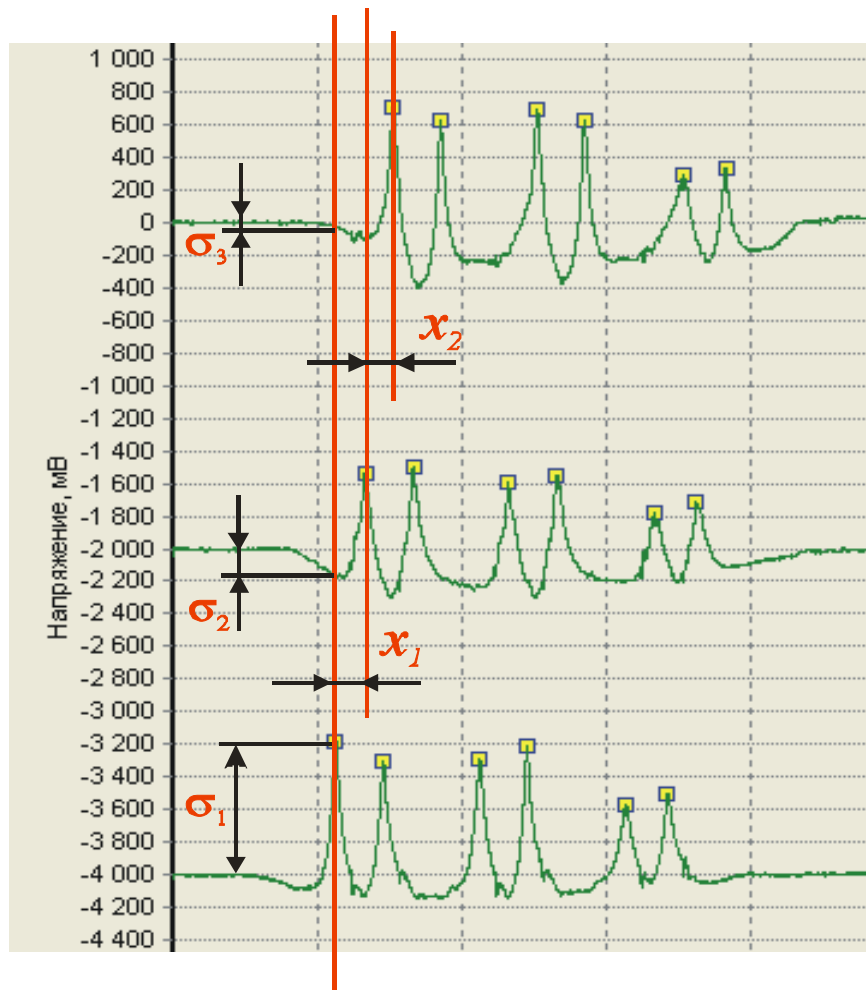


Рисунок 4.3 – Визначення напружень і відстаней за результатами цифрового запису

Обробка даних виконувалась автоматично за допомогою спеціально створеного програмного забезпечення. Приклад результатів розрахунку модуля пружності для деякої кількості заїздів поїзду наведено на рис. 4.4.

Подальший аналіз отриманих результатів показав, що основним фактором, який впливає на розкид розрахованих значень модуля пружності, є наявність горизонтальної складової сили, що передається від колеса на рейку.

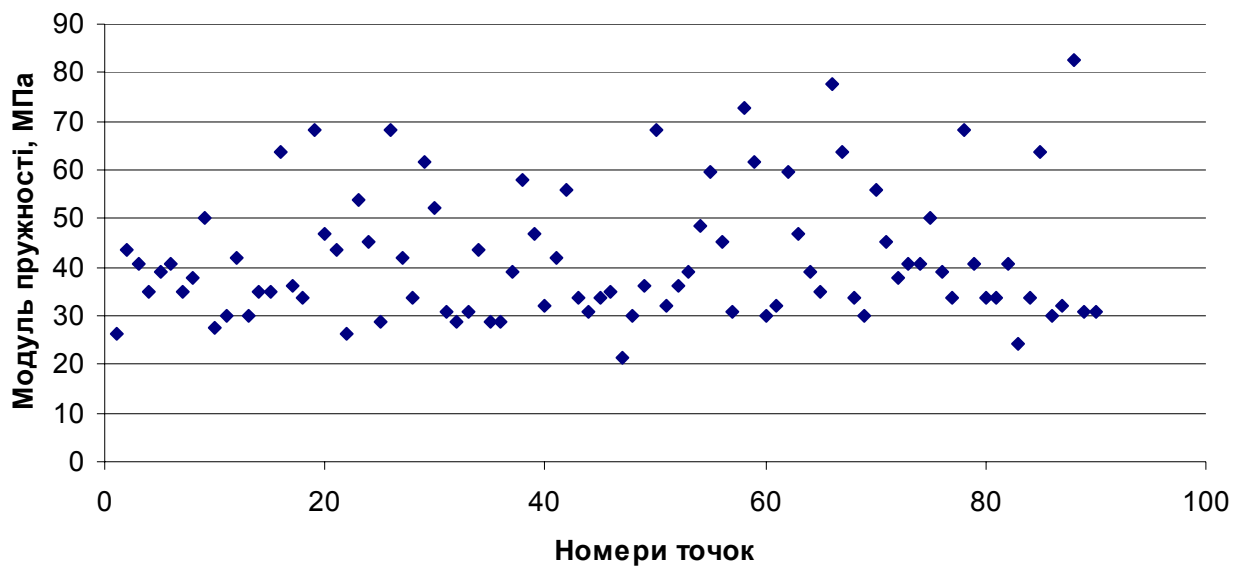


Рисунок 4.4 – Попередні результати розрахунку модуля пружності підрейкової основи

Для оцінки горизонтальної складової сили використовувалася загальновідома методика розрахунку бокової сили проф. О. П. Ершкова за кромочними напруженнями в головці та підшві рейки [6]. Абсолютні значення бокової сили наведено на рис. 4.5.

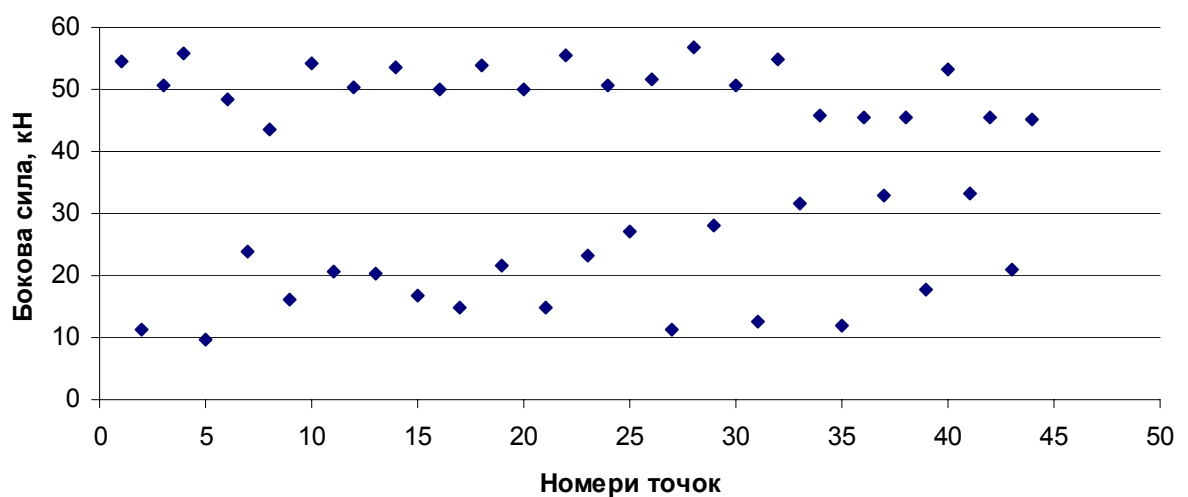


Рисунок 4.5 – Результати розрахунку бокової сили

Суттєвий перерозподіл сил, що діють від колеса на рейку, і, відповідно, зміщення розрахованого значення модуля пружності, відбувається при наявності контакту реборди колеса з рейкою. Значення бокової сили, при яких спостерігається такий варіант контакту колеса і рейки, можуть бути визначені аналітично або за аналізом даних, наведених на рис. 4.5. При появі контакту реборди колеса з рейкою відбувається різкий перерозподіл сил, що можна спостерігати, якщо представити наведені на рис. 4.5 дані у порядку зростання, рис. 4.6.

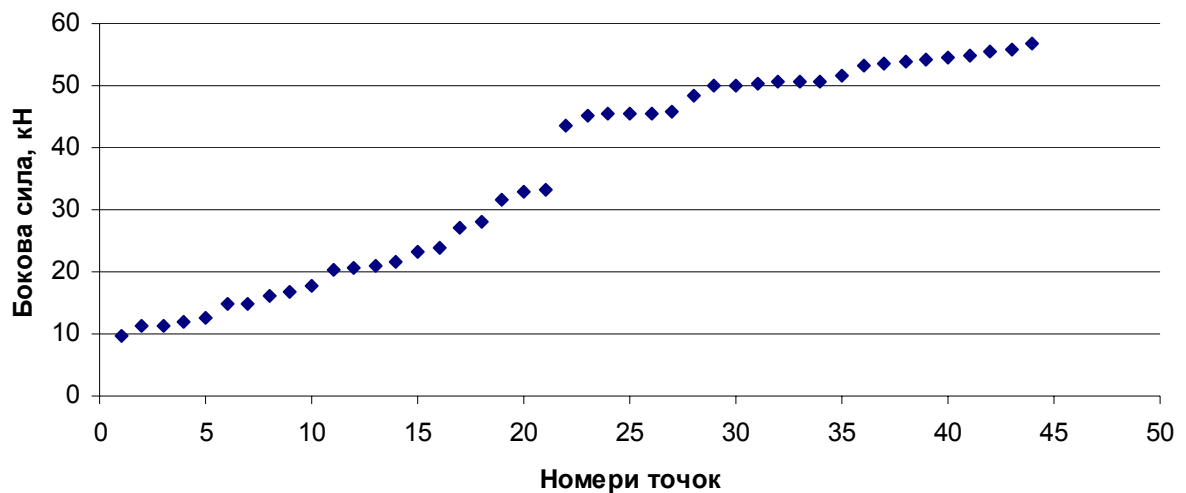


Рисунок 4.6 – Значення бокової сили у порядку зростання

Якщо з прикладу розрахунку модуля пружності (рис. 4.4) вилучити варіанти, яким відповідають значення бокової сили після стрибка (рис. 4.6), розкид результатів буде значно меншим, рис. 4.7.

Для наведеного прикладу середнє значення модуля пружності підрейкової основи (див. рис. 4.7), яке і рекомендовано прийняти як розрахункове для розглянутої ділянки, дорівнює 35 МПа. При цьому відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення склало 0.16, що не перевищує рекомендованого інтервалу довіри 0.4 [156, 138, 140].

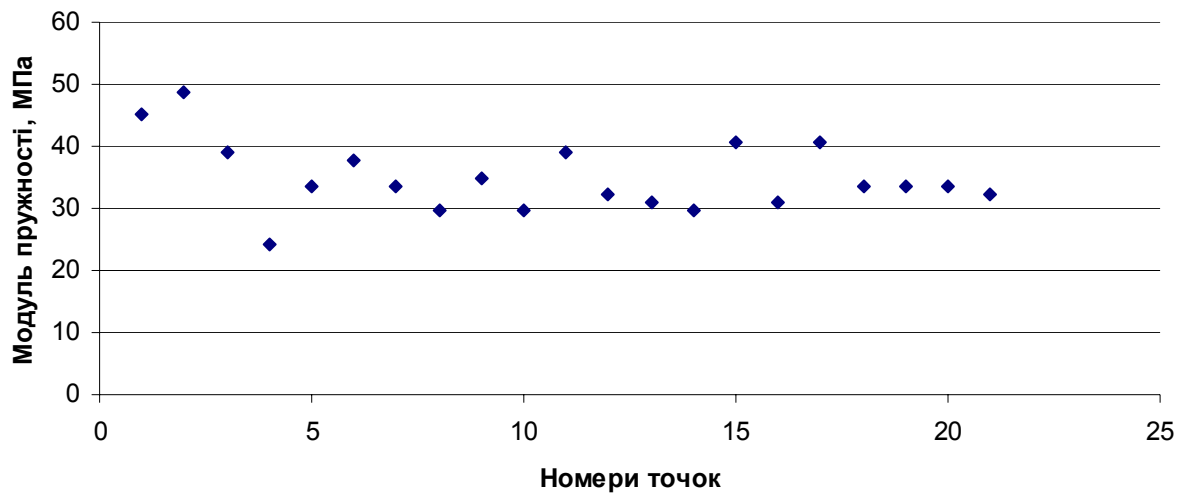


Рисунок 4.7 – Остаточні результати розрахунку модуля пружності підрейкової основи

Запропоновану методику розрахунку можна використовувати й для аналогічних вимірів прогинів замість напружень. Звичайно, у цьому випадку, замість першої еквівалентної сили буде використовуватися друга з відповідним коефіцієнтом η [22]. Але такий підхід приведе до збільшення похибки отриманого значення модуля пружності. По-перше, по причині складності розмежування прогину рейки й прогину підрейкової основи. По-друге, в наслідок пологості функції $\eta = f(x)$ на відміну від функції $\mu = f(x)$, що зробить різницю вихідних даних для суміжних перерізів рейки менш чіткою.

При виконанні експериментів на ділянці Баришівка-Бориспіль Південно-Західної залізниці було обладнано датчиками дві ділянки, кожна з котрих мала три послідовних перерізи рейки, рис. 4.8, 4.9.

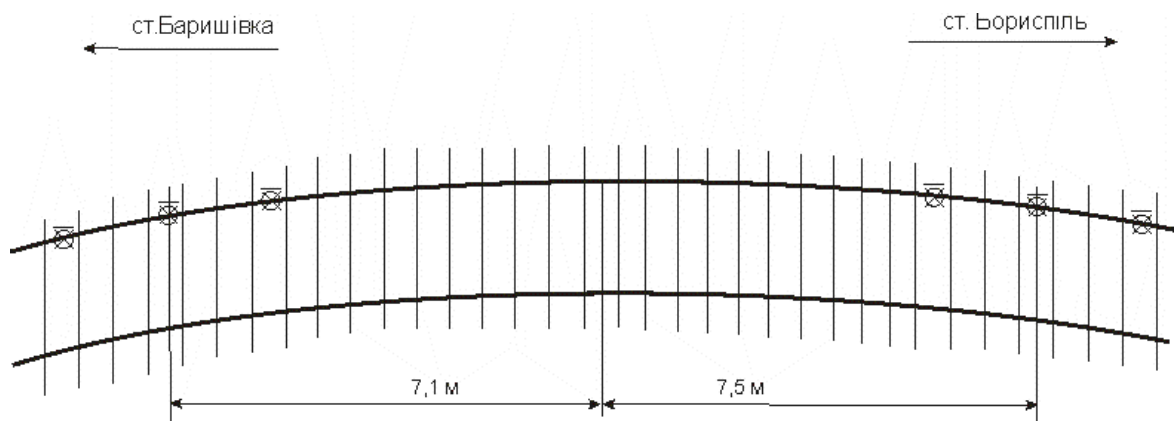


Рисунок 4.8 – Схема розташування датчиків на дослідній ділянці



Рисунок 4.9 – Послідовність трьох перерізів рейки, обладнаних датчиками

Напруження і відстані між точками визначалися автоматизовано за результатами цифрового запису, рис. 4.3. Для зменшення впливу суміжних коліс розглядалися тільки такі варіанти розташування рухомого складу, коли перше колесо першого локомотива заїжджає на перший переріз рейки, або, навпаки, останнє колесо останнього локомотива з'їжджає з останнього перерізу рейки. Взагалі, в даному експерименті по дослідній ділянці рухався поїзд, що складався з такої послідовності: локомотив ЧС-8, два пасажирських вагона, локомотив ЧС-8. Заїзди виконувалися в обидва напрямки з різними швидкостями руху. Напруження в рейках розглядалися на зовнішній кромці головки та на зовнішній і внутрішній кромці підшви.

Таким чином, було отримано близько 300 результатів визначення модуля пружності підрейкової основи, рис. 4.10. Обробка виконувалась автоматично за допомогою спеціально створеного програмного забезпечення. Враховуючи значну кількість матеріалу, результати, які з різних причин не були оброблені автоматично, не розглядалися. Їх кількість склала близько 10 %.

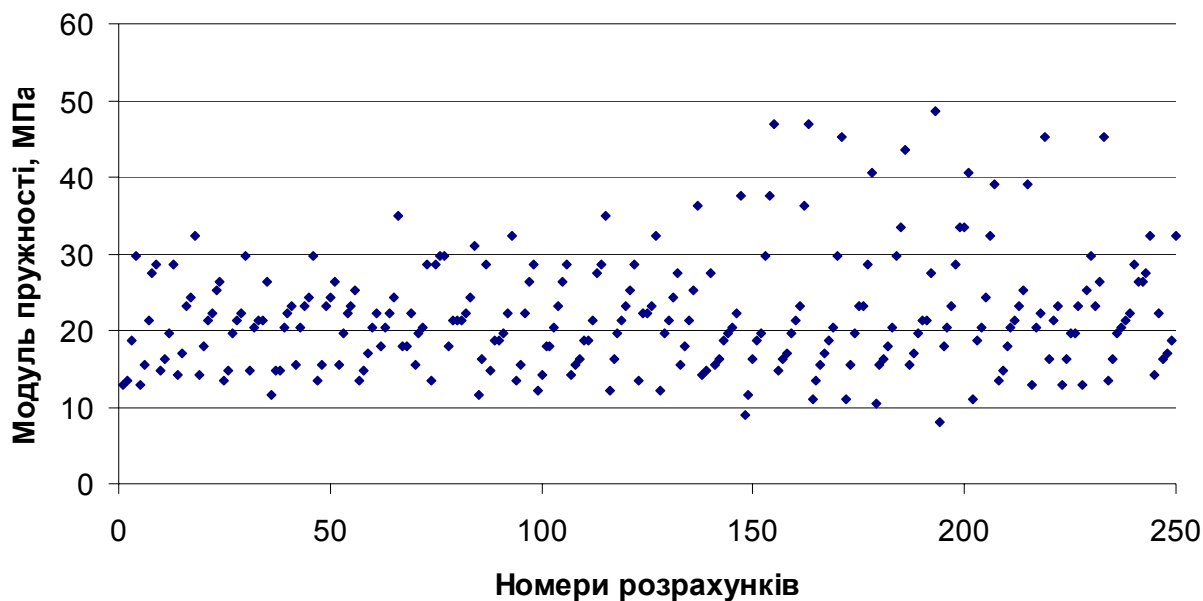


Рисунок 4.10 – Результати розрахунку модуля пружності підрейкової основи

Середнє значення модуля пружності підрейкової основи (див. рис. 4.10), яке і рекомендовано прийняти як розрахункове для розглянутої ділянки, дорівнює 22 МПа. При цьому відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення склало 0.34, що не перевищує рекомендованого інтервалу довіри 0.4 [156]. Достовірність отриманих даних може бути поліпшена, якщо відстань між датчиками вимірювати безпосередньо на місцевості та збільшити кількість розглянутих перерізів рейки.

Аналіз отриманих даних не виявив різниці в результатах для двох ділянок розташованих на відстані близько 15 м (див. рис. 4.8). Також не спостерігалось впливу на результат таких факторів, як напрямок та

швидкість руху поїзда. Однак слід відмітити, що майже всі заїзди зі швидкостями руху 160 км/год і вище було виключено з розглядання під час автоматичної обробки даних.

Розглянуто теоретичні основи отримання величин модуля пружності підрейкової основи та можливість їх практичної реалізації. Методика визначення фактичних значень модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу дозволяє отримати уточнені значення швидкості рухомого складу при проїзді поїзду по дослідній ділянці, режим руху по ділянці, зокрема вплив рухомого складу на обидві нитки рейкової колії, співвідношення напружень та сил, що діють на рейки при проїзді поїзду, зміну напружень від наявності фактичних нерівностей та вплив нерівностей на рух поїзда по дослідній ділянці, внесок роботи рейки як балки на значення модуля пружності підрейкової основи при зміні дискретних значень модуля пружності підшпальної основи.

4.2 Експериментальне визначення сил дії від колеса на рейку для сучасних пасажирських поїздів

Метою експериментальних досліджень була практична оцінка динамічного впливу на колію сучасних пасажирських поїздів, які передбачається експлуатувати на території України на напрямках швидкісного руху. Для проведення випробувань були використані експериментальні поїзди Talgo і Skoda, які досліджувала Колієвимірювальна ГНДЛ ДНУЗТ. Поїзд Talgo складався з локомотива KZ4A та зчленованих пасажирських вагонів з суміжним обпиранням на одновісні візки. Поїзд Skoda складався з моторних та причіпних вагонів з окремим обпиранням на двовісні візки. Схеми експериментальних поїздів наведено на рис. 4.11 і 4.12.

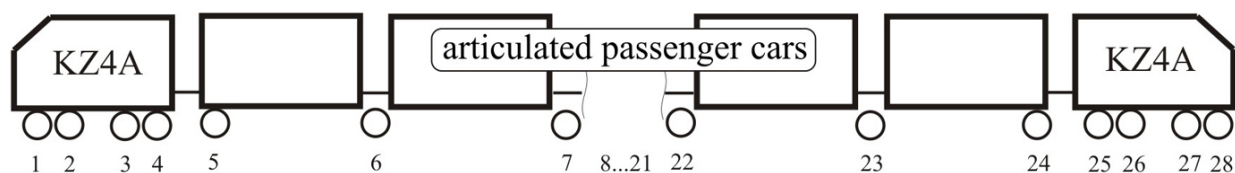


Рисунок 4.11 – Схема експериментального поїзда Talgo

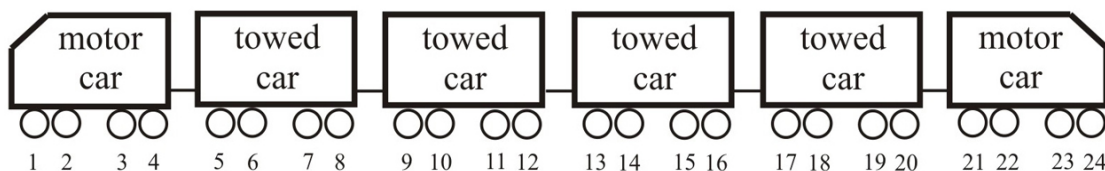


Рисунок 4.12 – Схема експериментального поїзда Skoda

Експериментальні випробування відбувалися на прямих ділянках колії без наявності відхилень в утриманні, які б вимагали обмеження швидкості. Верхня будова колії обох дослідних ділянок складалася з безстикової пліти рейок Р65, залізобетонних шпал, щебеневого баласту товщиною (разом з пісчаною подушкою) не менше 60 см під шпалою. Максимальна швидкість руху складала 176 і 200 км/год для поїзда Skoda і Talgo відповідно.

Одними з основних показників, які вимірювалися при проходженні експериментальних поїздів по дослідній ділянці, були напруження в рейках в декількох перерізах на головці, в шийці та на підшві. Приклад встановлення тензометричних датчиків в перерізі рейки показано на рис. 4.13, приклад запису напружень з вікна програмного забезпечення, в якому проводилась обробка даних [138], – рис. 4.14.



Рисунок 4.13 – Встановлення датчиків на рейці



Рисунок 4.14 – Приклад запису напружень в рейці (напруження на кромці підшви від проходження поїзда Skoda із швидкістю 176 км/год)

Значення вертикальної сили, що діє від колеса на рейку, розраховувалися за результатами вимірювань напружень в рейках:

$$Q = 4kW\sigma, \quad (4.5)$$

де W – момент опору рейки;

σ – полусума напружень, виміряних на зовнішній та внутрішній кромці підшви рейки.

Обробка статистичних даних показала достатню відповідність отриманого розподілення значень вертикальної сили (рис. 4.15) до закону Гауса (див. рис. 2.5). Для кожного рівня швидкості було визначено середнє значення і середньоквадратичне відхилення динамічної сили. Для деяких задач моделювання процесу накопичення деформацій та інших потрібно мати не тільки максимально імовірне значення сили, а і діапазон її можливих значень [111]. А, наприклад, для задач оцінки стійкості колеса доцільні розрахунки з урахуванням мінімального імовірного значення вертикальної сили [148].

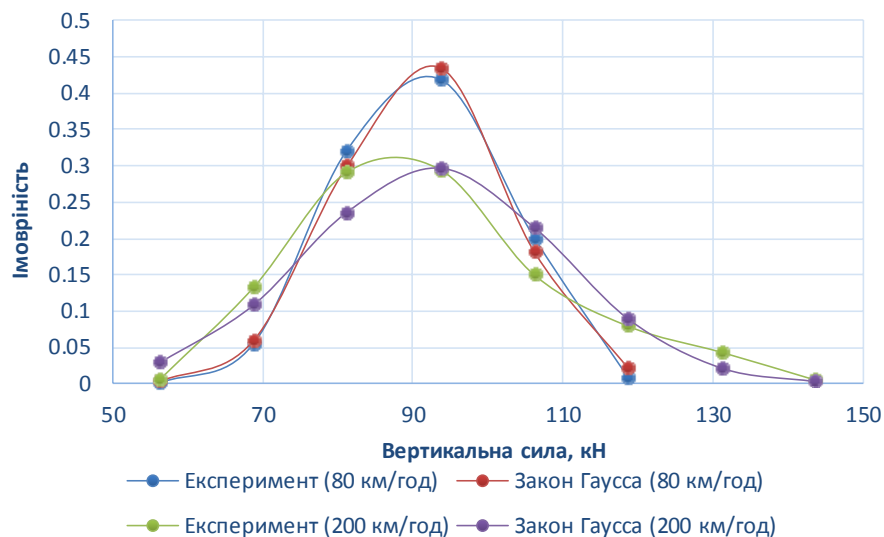


Рисунок 4.15 – Закон розподілу вертикальної сили від колеса на рейку для поїзда Talgo

На рис. 4.15 видно, що для низьких швидкостей (як приклад, 80 км/год) розподілення значень вертикальної сили, виміряні експериментально, майже повністю співпадають з теоретичним розподіленням за законом Гауса, що неодноразово підтверджувалось в багатьох дослідженнях [20, 80, 104, 113] та ін.; для високих швидкостей руху (на прикладі 200 км/год) експериментально отриманий закон розподілення

має асиметричне відхилення на 10%, причому в бік зменшення діючої сили у порівнянні із значеннями, які очікувалися теоретично.

Результати обробки експериментальних даних у вигляді залежності середніх та розрахункових значень вертикальної сили від швидкостей руху показано на рис. 4.16...4.19. Для візуального аналізу вони наведені в однаковому горизонтальному та вертикальному масштабі. Розрахункова динамічна сили була визначена як максимальна (мінімальна) з вірогідністю збільшення (зменшення) 0.994:

$$Q_{\text{dyn}} = \bar{Q} \pm 2.5S. \quad (4.6)$$

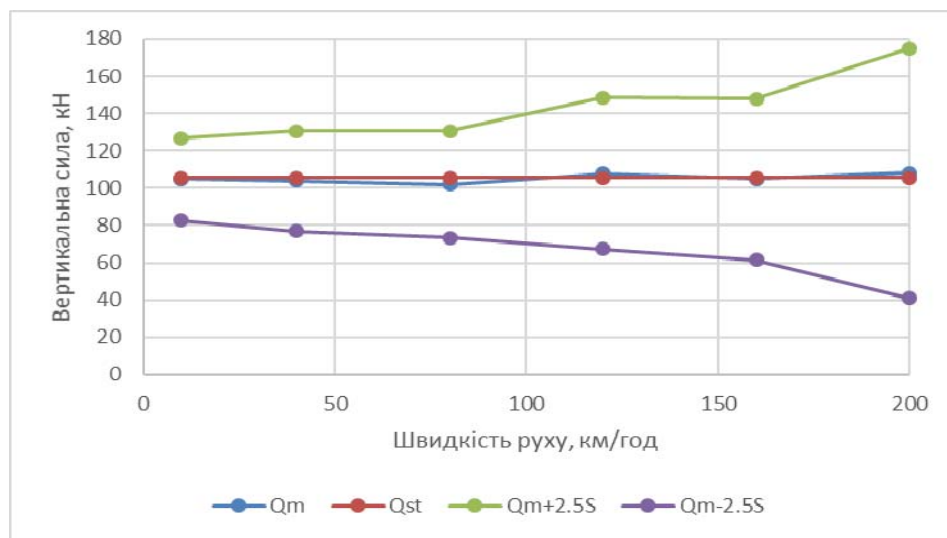


Рисунок 4.16 – Вертикальні сили за експериментальними дослідженнями для локомотива KZ4A пасажирського поїзда Talgo ($P_{\text{ст}}=105.5$ кН)

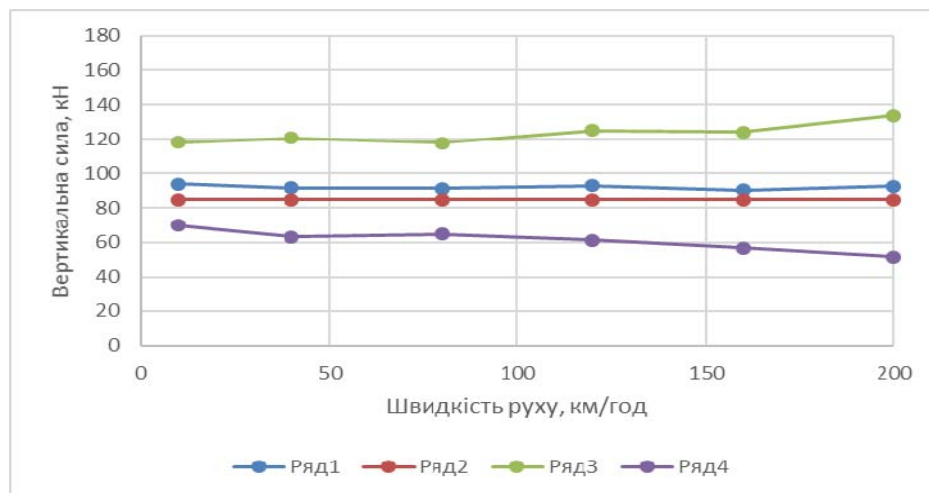


Рисунок 4.17 – Вертикальні сили за експериментальними дослідженнями для вагона пасажирського поїзда Talgo ($P_{\text{ст}}=85$ кН)

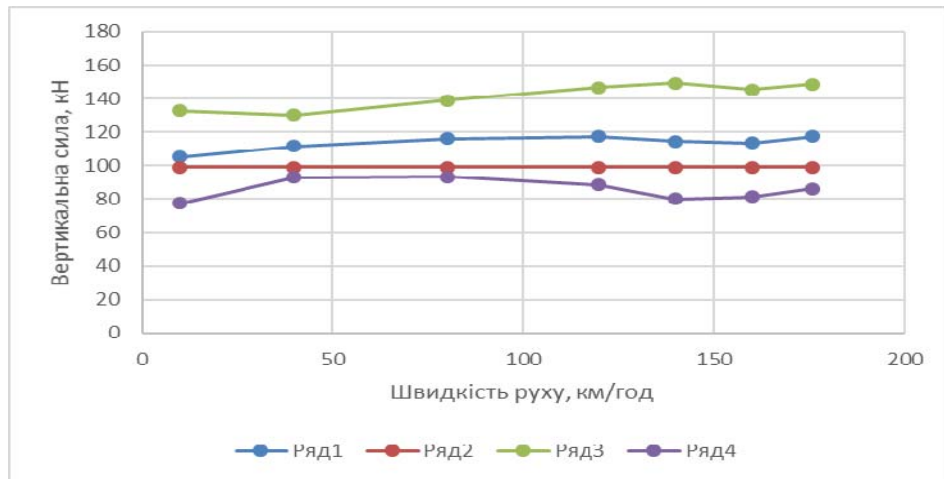


Рисунок 4.18 – Вертикальні сили за експериментальними дослідженнями для моторного вагона пасажирського поїзда Skoda ($P_{ст} = 99$ кН)

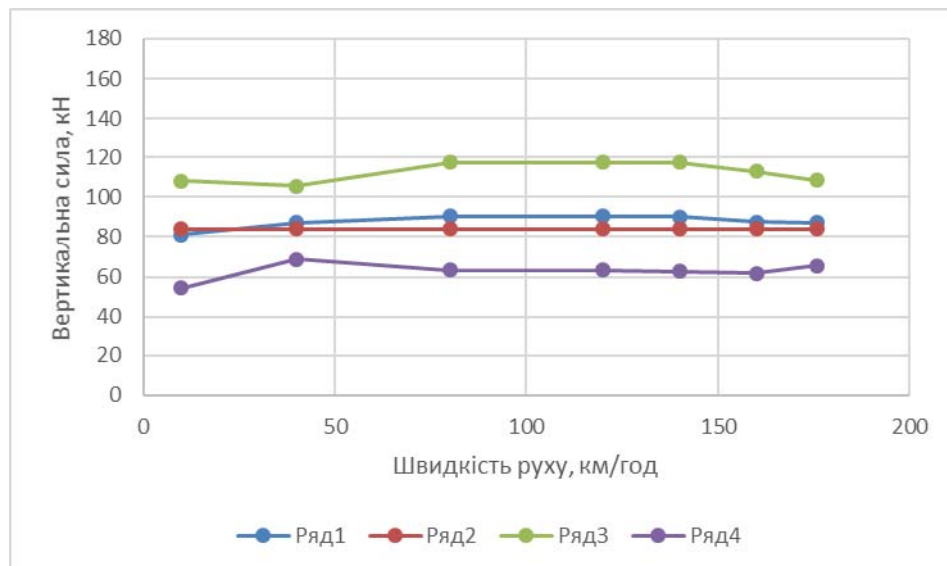


Рисунок 4.19 – Вертикальні сили за експериментальними дослідженнями для безмоторного вагона пасажирського поїзда Skoda ($P_{ст} = 84$ кН)

Залежність вертикальної сили дії колеса на колію від швидкості руху досліджувалась в багатьох наукових роботах ще наприкінці минулого століття. Але отримані результати як правило не виходили за межі 120 км/год і в більшій мірі стосувалися вантажних поїздів, як тих, що мають значне осьове навантаження і, відповідно, великий вплив на колію. Для таких умов експлуатації встановлювалась або лінійна залежність динамічної сили від

швидкості руху [109, 115], або майже лінійна (наближена до пологої параболи) [22, 104].

Сучасні пасажирські вагони мають суттєво поліпшені динамічні характеристики, перш за все за рахунок переходу від механічних ресорних систем до гідравлічних з автоматизованим керуванням. Такий підхід дає змогу позбутися зростання динамічного навантаження при збільшенні швидкості руху. Такий висновок підтверджується й проведеними автором експериментальними дослідженнями. Так, для локомотива спостерігається майже лінійна залежність максимальної вірогідної сили від швидкості руху (рис. 4.16), що відповідає розрахункам за діючими методиками [20, 22]. Для безмоторних вагонів така сила залишається без суттєвих змін навіть для високих швидкостей руху (рис. 4.17, 4.19). Аналогічні висновки для інших типів рухомого складу було отримано в роботах [178, 179].

4.3 Експериментальна оцінка впливу факторів, що визначають сили взаємодії колеса і рейки

Навіть без вираженої залежності від швидкості руху динамічна складова вертикальної сили для пасажирських вагонів має місце. Як правило, основними чинниками динамічної складової називають коливання надресорної будови екіпажу і коливання колії за рахунок її пружних властивостей та геометричних нерівностей.

Масив даних, отриманих експериментально для пасажирських поїздів, має три основні варіації: швидкість руху, номер осі вагона і місце перерізу колії, в якому виконувались вимірювання напружень в рейках. Можна вважати, що номер осі характеризує ймовірну складову коливань результатів вимірів, яка залежить від впливу рухомого складу, а номер перерізу колії – ймовірну складову, що залежить від залізничної колії. Було відібрано 8 перерізів колії, які не мали визначених відмінностей, і 8 осей, які дали майже однакові результати за вагами (осі 7-10 і 19-22 за рис. 4.11). Вплив певного з діючих факторів на величину, що досліджується, можна

визначити чисельно шляхом статистичної обробки даних за методикою факторного дисперсійного аналізу [157, 158].

Розглянемо окремо як діючий фактор номер вісі, що характеризує вплив конструкції і стану рухомого складу, і номер перерізу колії, що характеризує вплив руху колеса по динамічним нерівностям колії, які виникають в результаті коливань рейки.

В умовах експерименту маємо зміну рівня фактору (в обох випадках – 8 варіацій). Сутність факторного дисперсійного аналізу полягає в розкладанні загальної варіації випадкової величини на незалежні складові, кожна з яких характеризує вплив того чи іншого фактору [196]

$$x_{ij} = \bar{x} + \gamma_j + \zeta_{ij}, \quad (4.7)$$

де x_{ij} – результат i -го вимірювання напруження в рейці при j -му рівні фактору, що досліджується;

$\bar{x}$ – загальне середнє значення напружень;

γ_j – варіація напруження за рахунок впливу i -го рівня фактору;

ζ_{ij} – варіація напружень при постійному рівню фактору (за рахунок інших факторів або неврахованих впливів).

Вибір наступного набору формул для чисельного застосування факторного дисперсійного аналізу обґрунтовано підпорядкованістю отриманих експериментальних даних нормальному закону розподілення, що було доведеного автором в п. 4.2 (див. рис. 4.15).

Розглянемо вирішення поставленої задачі на прикладі встановлення чисельного рівня ступеня впливу номера вісі вагона на виміряні напруження в рейці при швидкості руху поїзда зі швидкістю 200 км/год. Матриця спотсережень наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Матриця спостережень для факторного диверсійного аналізу оцінки впливу номера вісі для швидкості руху 200 км/год

Номер вимірю- вання	Номера осей пасажирських вагонів							
	7	8	9	10	19	20	21	22
1	26.54	35.96	34.38	33.33	32.73	33.46	31.13	35.10
2	37.36	36.35	34.90	34.99	33.66	36.40	35.60	36.66
3	37.62	36.80	35.59	35.07	34.59	36.74	37.15	38.12
4	38.07	37.64	36.52	36.51	34.87	36.76	37.42	38.35
5	38.44	39.79	36.59	37.66	35.74	37.63	37.62	38.62
6	38.63	40.26	36.64	37.98	35.75	37.80	37.90	38.82
7	38.72	40.51	36.88	40.08	35.80	37.83	38.64	39.78
8	38.90	40.52	36.92	40.55	36.07	40.18	39.36	40.23
9	39.71	41.03	37.47	41.16	38.79	40.31	39.43	41.07
10	40.58	41.76	37.86	41.48	39.82	41.11	39.88	41.94
11	40.64	42.47	37.92	41.67	39.86	42.39	39.94	41.95
12	41.03	42.62	37.99	41.87	39.92	43.04	40.91	42.42
13	42.27	43.10	38.15	42.14	39.95	43.12	40.98	42.66
14	42.36	43.31	38.20	42.34	39.96	43.22	41.70	42.95
15	42.38	43.56	38.70	42.78	41.47	43.35	42.28	43.60
16	43.00	43.64	39.47	42.80	41.67	43.35	42.87	43.91
17	43.64	43.72	39.91	42.94	41.90	43.39	42.95	45.06
18	43.72	44.04	40.32	43.34	42.03	43.54	43.22	45.23
19	43.75	44.50	40.88	43.67	42.44	43.62	43.58	45.40
20	43.83	44.80	41.58	43.67	42.82	43.67	43.82	45.43
21	44.79	44.95	41.68	43.88	43.15	43.75	43.83	45.83
22	44.99	45.28	42.16	44.02	43.18	43.82	43.86	45.92
23	45.64	45.35	42.44	44.02	43.42	44.83	44.50	45.94
24	45.66	45.55	42.78	44.36	43.76	44.84	44.51	46.15
25	45.84	45.79	43.40	44.62	43.78	44.90	44.58	46.24
26	45.87	45.96	43.46	44.82	44.19	45.24	45.18	46.39
27	46.36	46.19	43.90	44.94	44.32	45.55	46.14	46.51
28	46.48	46.40	44.19	45.10	45.03	45.78	47.27	46.93
29	47.13	47.16	44.60	45.14	45.66	45.86	47.49	47.36
30	47.65	47.45	45.04	45.22	45.96	46.27	47.76	47.51
31	47.77	47.69	45.26	45.35	46.11	46.68	47.81	48.13
32	48.04	47.95	47.09	45.84	47.37	46.72	48.21	48.27
33	48.56	48.16	47.24	46.34	47.75	46.91	49.57	49.72
34	48.72	49.16	47.40	46.40	48.17	47.36	49.69	49.76
35	49.05	49.40	47.95	46.51	48.23	47.64	50.44	49.89

Закінчення таблиці 4.1

36	49.09	49.52	47.96	46.95	48.51	47.72	50.73	49.95
37	49.33	49.97	48.53	47.03	48.72	47.91	50.77	50.41
38	49.77	50.17	48.69	47.43	48.88	48.36	50.85	50.91
39	50.36	50.31	49.01	47.72	50.00	48.45	50.92	51.31
40	50.57	50.77	49.07	48.01	50.33	49.19	50.99	52.29
41	50.59	50.92	49.21	48.19	50.77	49.28	51.37	52.33
42	50.72	51.32	49.48	48.61	51.11	49.68	51.43	53.01
43	50.89	51.92	49.79	48.85	51.36	50.17	51.52	53.09
44	51.03	52.77	50.13	49.01	51.60	50.19	53.07	53.72
45	51.31	52.92	50.80	49.85	52.08	50.21	53.59	53.97
46	52.09	53.05	51.39	49.88	52.11	50.71	54.65	54.07
47	52.27	53.83	51.69	49.96	52.47	50.75	54.68	54.12
48	52.65	53.96	51.85	50.01	52.85	50.88	54.71	54.57
49	53.08	54.39	52.21	50.45	54.01	50.96	54.91	55.36
50	53.12	54.69	53.07	50.71	54.61	51.71	55.57	55.43
51	53.21	55.39	53.11	51.03	55.29	52.16	55.60	57.67
52	53.56	55.51	53.21	51.19	55.32	52.28	56.28	58.61
53	54.63	55.52	54.63	51.31	55.47	52.79	56.76	59.19
54	55.11	55.64	56.00	51.47	55.55	53.52	57.17	60.70
55	55.27	56.45	56.72	51.52	56.29	53.81	57.27	60.80
56	55.83	56.96	59.59	51.69	56.95	54.12	57.56	60.80
57	56.36	57.44	59.75	51.76	57.92	54.24	57.73	61.58
58	56.96	57.84	59.96	51.92	57.99	54.84	58.20	62.62
59	57.21	63.62	61.40	52.11	59.00	54.91	60.04	62.93
60	57.80	63.86	62.48	52.55	59.87	57.17	61.14	63.89
61	58.53	64.48	64.24	52.57	60.50	57.39	61.49	64.58
62	59.80	66.21	64.74	52.71	61.09	57.93	62.70	65.18
63	59.92	66.37	68.40	52.89	62.92	58.51	63.14	65.40
64	60.13	67.33	68.46	55.59	62.96	58.91	63.17	66.82
65	60.66	67.74	69.77	56.75	63.64	59.40	65.49	67.74
66	64.33	68.00	70.90	59.72	63.65	59.57	66.86	68.89
67	64.40	68.70	70.98	59.79	65.18	62.24	67.97	69.22
68	65.28	68.72	71.64	60.82	65.58	62.90	68.08	75.26
69	66.90	69.30	72.26	61.12	69.10	47.93	49.76	51.24
70	70.02	73.95	72.50	65.66	77.21	47.93	49.76	51.24

Середнє арифметичне всієї сукупності спостережень

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{q_j} x_{ij}, \quad (4.8)$$

$$n = \sum_{j=1}^p q_j, \quad (4.9)$$

де n – загальна кількість вимірювань в матриці спостережень;

q_j – кількість спостережень для j -го рівня фактора;

p – кількість рівнів фактора.

Середнє значення спостережень j -го рівня фактору

$$\bar{x}_j = \frac{1}{q_j} \sum_{i=1}^{q_j} x_{ij}. \quad (4.10)$$

Факторне розсіювання, тобто розсіювання значень спостережуваної величини, викликане зміною рівня фактора, визначається за формулою

$$Q_{\Phi} = \sum_{j=1}^p \left[q_j (\bar{x} - \bar{x}_j)^2 \right]. \quad (4.11)$$

Залишкове розсіювання – розсіювання за рахунок неврахованих факторів:

$$Q_{\text{зал}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{q_j} (\bar{x}_j - x_{ij})^2. \quad (4.12)$$

Факторна σ_{Φ} і залишкова $\sigma_{\text{зал}}$ дисперсії визначаються за формулами:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{Q_{\Phi}}{k_1}; \quad (4.13)$$

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{k_2}; \quad (4.14)$$

де k_1 і k_2 – степені вільності, $k_1 = p - 1$, $k_2 = n - p$.

Оцінкою ступеня впливу досліджуваного фактора на спостережувану величину є критерій F [158]

$$F = \frac{\sigma_{\Phi}}{\sigma_{\text{зал}}}. \quad (4.14)$$

Чим більше значення критерію F , тим сильнішим є вплив досліджуваного фактора.

Відповідно до рівня значущості α та степенів вільності k_1 і k_2 існує таке критичне значення $F_{кр} = f(\alpha, k_1, k_2)$, що за виконання умови $F < F_{кр}$ можна досягти висновку, що досліджуваний фактор взагалі не впливає на спостережувану величину [196].

Результати розрахунків за наведеними формулами відповідно до матриці спостережень (табл. 4.1) наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Матриця спостережень для факторного дисперсійного аналізу оцінки впливу номера вісі для швидкості руху 200 км/год

Q_{ϕ} , МПа ²	$Q_{\text{зал}}$, МПа ²	k_1	k_2	σ_{ϕ} , МПа ²	$\sigma_{\text{зал}}$, МПа ²	F
890	41387	7	553	127,13	74,84	1,699

Продовження розрахунків (факторні дисперсійні аналізи для інших варіантів) наведено в Додатку В (табл. В.2...В.5).

Для різних значень швидкості руху результати оцінки впливу розглянутих факторів принципово не змінюється. Для діапазону 40...200 км/год було отримано ступінь впливу (за коефіцієнтом Фішера) номера вісі вагону на рівні 1.7; ступінь впливу номера перерізу рейки – 120.0 при рівні критичного значення коефіцієнта Фішера для розмірів розглянутих вибірок 2,03 [196]. Загальна кількість вимірювань в матриці спостережень коливалась для різних рівнів швидкості руху. Найменша кількість (для швидкості 200 км/год) складала 560 значень. Розрахунки за факторним дисперсійним аналізом наведені в Додатку В (табл. В.2...В.5).

Проведений статистичний аналіз чисельно підтверджує, що коливання кузова в сучасних пасажирських вагонах якісно гасяться і не приводять до суттєвого збільшення вертикальної сили тиску колеса на рейку.

Основним фактором збурення динамічної сили можна вважати проходження колесом динамічної нерівності колії, яка утворюється навіть за відсутністю суттєвих геометричних нерівностей внаслідок коливань рейки на пружній підрейковій основі. Отримані результати збігаються з висновками автора, отриманими в п.2.2. на основі аналітичного аналізу.

4.4 Експериментальна оцінка напружень в підрейковій основі від сучасних пасажирських поїздів

Відповідно до типових програм випробування рухомого складу і більшості конструкцій залізничної колії, датчики для вимірювання напружень встановлюються тільки на рейках. Це має сенс, враховуючи, що саме в рейках виникають найбільші значення напружень у порівнянні з іншими елементами колії; їх величина залежить не тільки від дії зовнішнього навантаження, а й від прогину рейки, тобто від пружної відповіді всієї підрейкової основи, що дає змогу оцінювати роботу всієї конструкції; технологічно простіше встановити тензометричні датчики на рейках, які дозволяють вимірювати напруження вигину, ніж датчики для вимірювання тиску в глибині шарів баласту або земляного полотна тощо.

В рамках випробування пасажирського поїзда Skoda Колієвипробувальною ГНДЛ ДНУЗТ на прохання автора дисертації додатково до типового набору датчиків було встановлено декілька месдоз – приладів для вимірювання напружень тиску в товщі речовини. Це дозволило отримати експериментальні значення напружень, що виникають в баласті.

Основною метою таких вимірювань було проведення одного з кроків верифікації розробленої просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності. Як вже відмічалось в попередньому розділі, розв'язком основної системи рівнянь розробленої моделі є саме напруження в шарах підрейкової основи.

Месدوزи встановлювались в товщі баласту в перерізах під шпалою і між шпалами по вісі головки рейки на різних відмітках глибини відносно

підшви шпали. Схема розташування месдоз приведена на рис. 4.20. Приклад встановлення месдоз на дослідній ділянці показано на рис. 4.21. Декілька додаткових фотографій, які демонструють процес обладнання дослідної ділянки месдозами, показано в Додатку Д на рис. Д.1-Д.6.

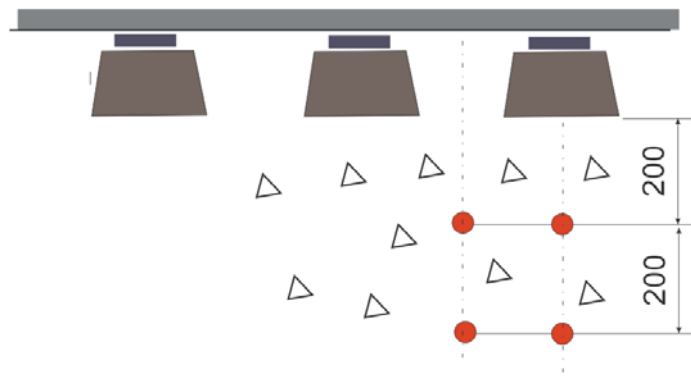


Рисунок 4.20 – Схема встановлення месдоз



Рисунок 4.21 – Приклад встановлення месдоз на дослідній ділянці

Вимірювання за допомогою месдоз відбувалися за допомогою відповідного цифрового обладнання. Приклад запису з месدوزи №1 (див. рис. 4.20) при швидкості руху 176 км/год показано на рис. 4.22.

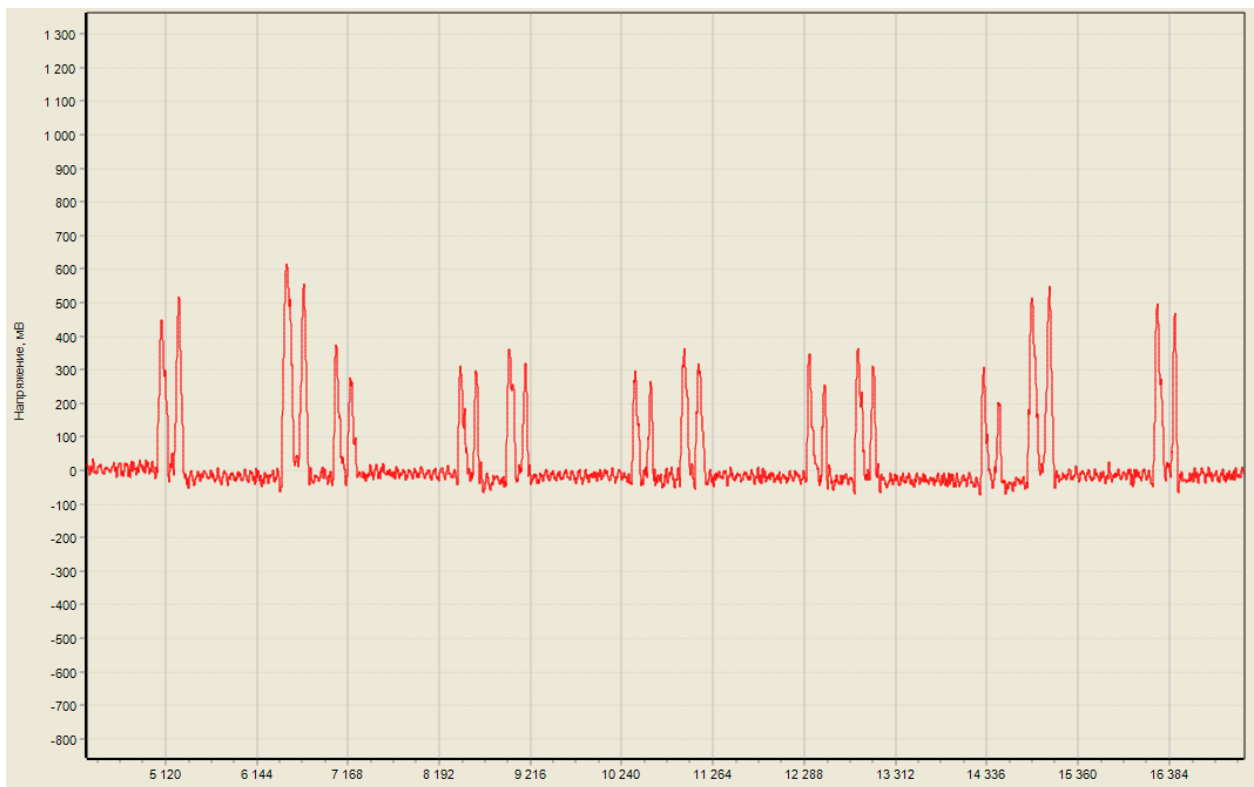


Рисунок 4.22 – Приклад запису даних з месдозы №1 при швидкості руху
176 км/год

В результаті обробки цифрових записів для кожного заїзду дослідного поїзда (див. рис. 4.12) визначалися максимальні спостережені значення тиску в баласті під кожною з 24 осей рухомого складу (1...4 і 21...24 відносяться до моторного вагону, з 5 по 20 – для немоторних вагонів). Обробка і аналіз записів виконувалися автором дисертації особисто. Результати обробки наведено в Додатку Д в табл. Д.1-Д.7.

Основні результати статистичної обробки даних, з угрупованням для моторного і безмоторного вагонів, наведено а табл. 4.3 і 4.4.

Таблиця 4.3 – Результати статистичної обробки тиску в баласті від моторного вагону, кПа

Показник	Швидкість руху, км/год						
	40	60	80	120	140	160	170
	на рівні 20 см від підшви шпали						
Мінімальне спостереження	40.4	46.3	40.4	35.6	41.5	46.5	55.3
Середнє значення	55.6	60.1	59.0	59.6	63.5	58.9	64.8
Максимальне спостереження	80.0	80.2	84.1	81.5	82.7	72.8	80.5
Середньо-квадратичне відхилення	9.120	9.735	9.767	10.187	9.876	6.697	6.910
Розраховане*	57.6 (від сили 118 кН)						
	на рівні 40 см від підшви шпали						
Мінімальне спостереження	28.8	33.7	30.8	28.9	27.7	30.8	31.4
Середнє значення	39.1	41.6	41.8	41.8	39.6	39.7	39.4
Максимальне спостереження	55.3	54.9	55.5	55.6	52.4	54.0	52.3
Середньо-квадратичне відхилення	5.966	5.619	5.765	6.326	6.334	5.077	5.271
Розраховане*	38.15 (від сили 118 кН)						

Для контролю отриманих даних були виконані розрахунки відповідних напружень за методикою, наведеною в ЦП-0117 [22]. У відповідності до опису умов проведення експерименту були прийняті наступні вихідні дані: модуль пружності підрейкової основи 40 МПа; сила, діюча від колеса на рейку, 118 кН для моторного вагону і 90 кН для безмоторного для всіх значень швидкості у відповідності до рис. 4.18-4.19. Отримані значення напружень наведено в табл. 4.3-4.4 як параметр «Розрахункове». Як показують результати, наведені в цих таблицях, отримані експериментально значення напружень в баласті не протирічать тим, що очікувались.

Таблиця 4.4 – Результати статистичної обробки тиску в баласті від неоторного вагону, кПа

Показник	Швидкість руху, км/год						
	40	60	80	120	140	160	170
	на рівні 20 см від підшви шпали						
Мінімальне спостереження	19.3	21.9	19.8	23.7	26.7	31.4	24.6
Середнє значення	33.8	36.6	36.0	39.6	43.9	41.2	37.5
Максимальне спостереження	54.5	52.6	53.7	60.6	57.8	52.1	46.2
Середньо-квадратичне відхилення	8.607	8.719	8.036	9.603	7.343	4.646	5.555
Розраховане*	43.98 (від сили 90 кН)						
	на рівні 40 см від підшви шпали						
Мінімальне спостереження	14.6	19.4	19.3	18.7	18.8	20.7	14.7
Середнє значення	24.6	26.4	27.2	27.8	26.1	26.1	21.9
Максимальне спостереження	36.3	35.6	35.4	37.2	32.9	31.3	27.3
Середньо-квадратичне відхилення	5.135	4.443	4.392	4.342	3.697	2.728	3.379
Розраховане*	29.1 (від сили 90 кН)						

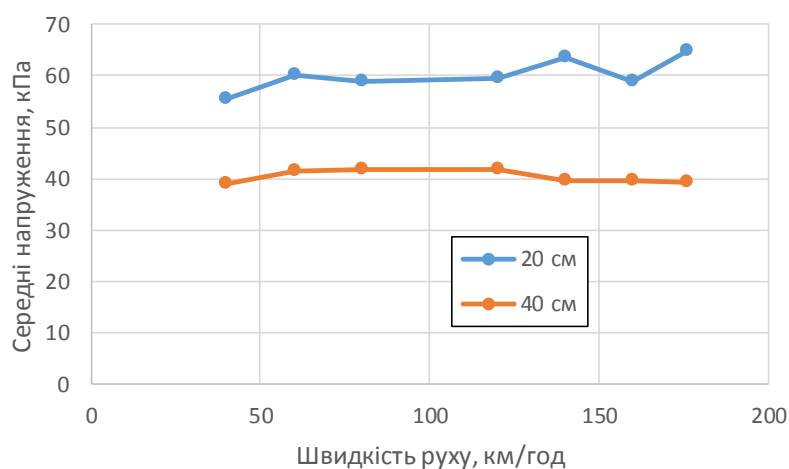


Рисунок 4.23 – Залежність середніх вимірних напружень в баласті від швидкості руху для моторного вагону

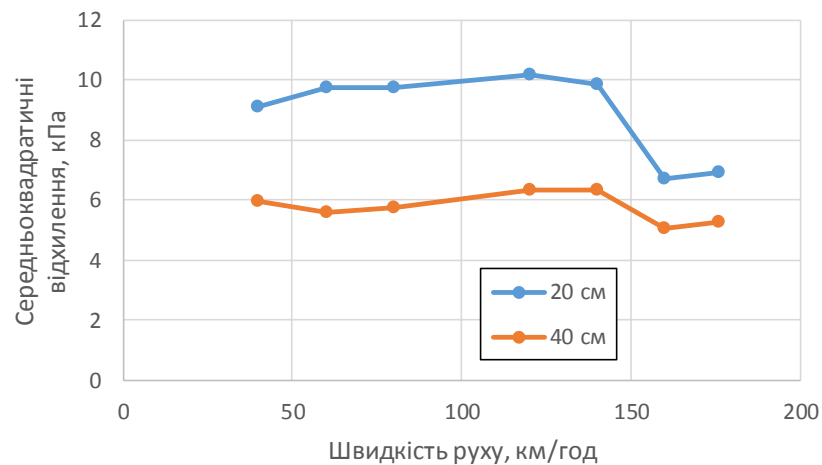


Рисунок 4.24 – Залежність середньоквадратичних відхилень напружень в баласті від швидкості руху для моторного вагону

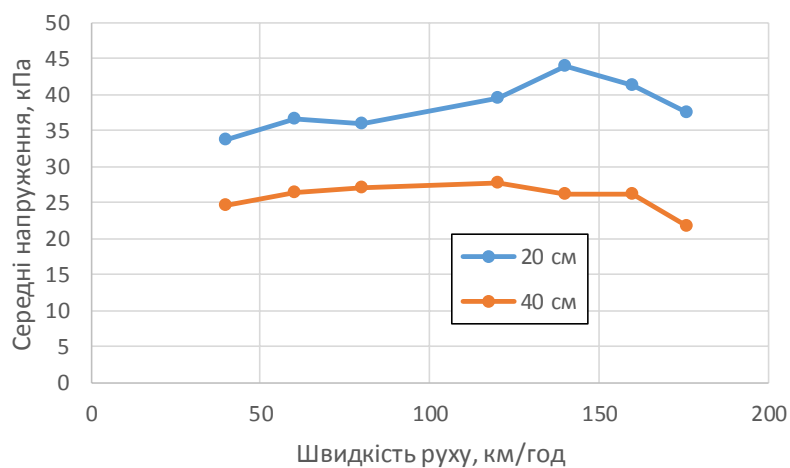


Рисунок 4.25 – Залежність середніх вимірних напружень в баласті від швидкості руху для безмоторного вагону

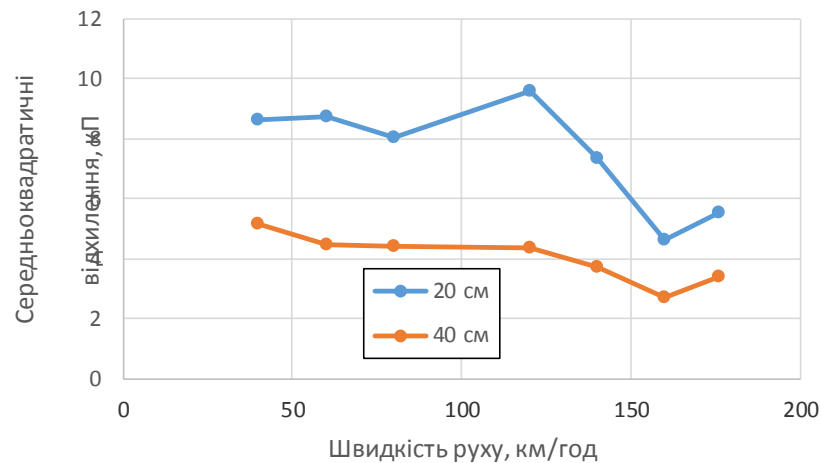


Рисунок 4.26 – Залежність середньоквадратичних відхилень напружень в баласті від швидкості руху для безмоторного вагону

Середні значення напружень в щебені гарно корегуються з середніми значеннями сили, що діє від колеса на рейку (див. рис. 4.18-4.19). Відсутність чіткої залежності значень сили від швидкості руху пояснює відсутність такої залежності і для значень напружень в баласті. Дані на рис. 4.24 і 4.26 через середньоквадратичні відхилення показують відсутність великих коливань значень напружень відносно середнього, причому для високих швидкостей (160, 176 км/год) вони навіть зменшуються. При переході з глибини 20 см в щебені відносно підшви шпали до глибини 40 см напруження зменшується в 1.4...1.6 разів, що відповідає очікуваному за аналітичними розрахунками значенню в 1.5.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Запропонована та випробувана методика визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами обробки напружень, вимірюваних в послідовності перерізів рейки від дії рухомого складу.

2. На прикладі визначення модуля пружності підрейкової основи на ділянках за результатами експериментальних вимірювань, підтверджено, що його значення, особливо в літній період, можуть бути меншими за

розрахункові, встановлені відповідно до довідникових джерел. Так, на двох дослідних ділянках, які відносяться до I-ї категорії колії і не мають відхилень в утриманні більше за 2-гу ступінь, було визначено модулі пружності підрейкової основи на рівні 22 і 35 МПа. Чим менше модуль пружності, тим менше швидкості поширення напружень в шарах підрейкової основи і, як наслідок, при менших швидкостях руху можуть спостерігатися динамічні ефекти, які виходять за межі адекватності квазістатичних розрахунків.

3. За результатами експериментальних досліджень отримані закони розподілення сили, діючої від колеса на рейку, для сучасних пасажирських поїздів (на прикладі Talgo і Skoda) для швидкостей до 200 км/год включно. Для низьких швидкостей (80 км/год) розподілення значень вертикальної сили, виміряні експериментально, майже повністю співпадають з теоретичним розподіленням за законом Гауса; для високих швидкостей руху (200 км/год) експериментально отриманий закон розподілення має асиметричне відхилення на 10% в бік зменшення діючої сили.

4. За результатами експериментальних досліджень отримані залежності динамічних значень вертикальної сили від швидкості руху до 200 км/год включно для сучасних пасажирських поїздів. Для локомотива спостерігається майже лінійна залежність максимальної вірогідної сили від швидкості руху, що відповідає розрахункам за діючими методиками; для сучасних пасажирських вагонів рівень сили залишається без суттєвих змін навіть для високих швидкостей руху.

5. Результати факторного дисперсійного аналізу експериментальних даних чисельно підтверджують, що коливання кузова в сучасних пасажирських вагонах якісно гасяться і не приводять до суттєвого збільшення вертикальної сили тиску колеса на рейку. Основним фактором збурення динамічної сили можна вважати проходження колесом динамічної нерівності колії, яка утворюється навіть за відсутністю суттєвих геометричних нерівностей внаслідок коливань рейки на пружній підрейковій основі.

6. На прикладі сучасних пасажирських поїздів отримано експериментальні значення напружень в товщі підрейкової основи для швидкостей руху до 176 км/год включно. Основною метою експериментальних вимірювань було отримання даних для проведення верифікації розробленої просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, що буде розглянуто в наступному розділі.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

5.1 Використання розробленої моделі для визначення напружень в підрейковій основі

5.1.1 Визначення напружень в підрейковій основі для точок з різними просторовими координатами

Математична модель, яка описана в 3-му розділі, була реалізована автором роботи як спеціальна комп'ютерна програма (Додаток Ж), що дозволило виконувати і аналізувати варіантні розрахунки.

В розділі 4.4 за результатами експериментальних випробувань пасажирського поїзда при швидкостях руху до 176 км/год включно були отримані напруження в підрейковій основі. Тому, для прикладу розрахунків за розробленою моделлю приймемо ділянку з вихідними даними, що відповідають дослідній, для можливості подальшого порівняння результатів. Розглянемо ділянку з рейками Р65, залізобетонними шпалами, щебеневим баластом товщиною 0.5 м і модулем деформації 200 МПа, насип з модулем деформації ґрунту 25 МПа, що (як буде показано далі) відповідає загальному модулю пружності підрейкової основи 40 МПа. В якості зовнішнього навантаження будемо прикладати сили 118 кН і 90 кН для моделювання руху моторного і безмоторного вагонів (у відповідності до рис. 4.18-4.19).

На рис. 5.1 показані напруження на різній глибині (до 0.5 м в баласті і далі в земляному полотні) під шпалою, над якою розташована прикладена сила для моторного і безмоторного вагонів. На рис. 5.2 показано розподілення напружень в щебені на глибині 40 см вздовж поздовжньої осі «центральної» шпали ($x=0$) і суміжної шпали ($x=0.54$) для безмоторного вагону. Результати відповідають прикладанню зовнішнього навантаження по осі рейки ($z=0.8$). Система координат відповідає розрахунковій схемі, наведеній на рис. 3.24.

Напруження, отриманні за результатами моделювання (Додаток Е), показані вибірково. Розрахунки напружень за моделлю проведені в ширшому діапазоні, ніж наявні результати експерименту, що дозволило отримати більш цільну картину щодо напруженого стану підрейкової основи і врахувати можливі похибки в визначенні координат розміщення месдоз під час експерименту.

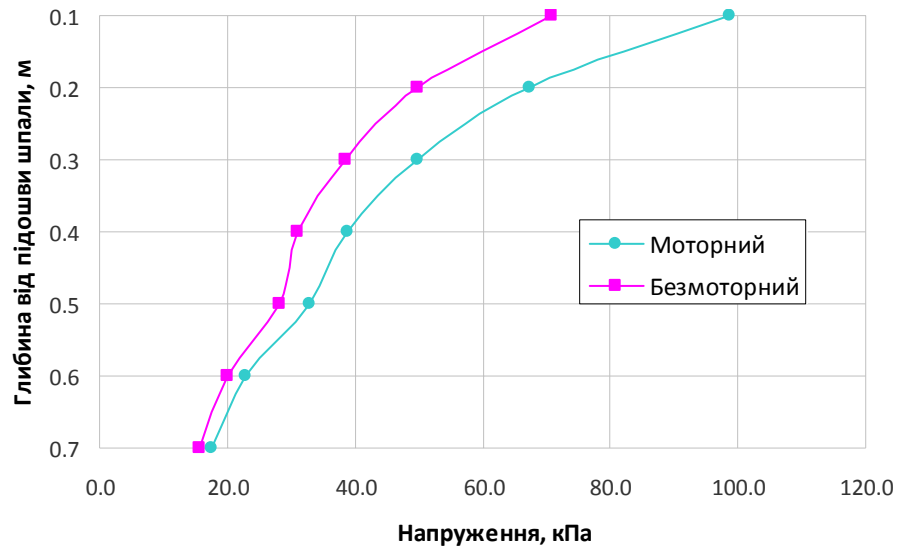


Рисунок 5.1 – Зміна напружень по глибині під шпалою

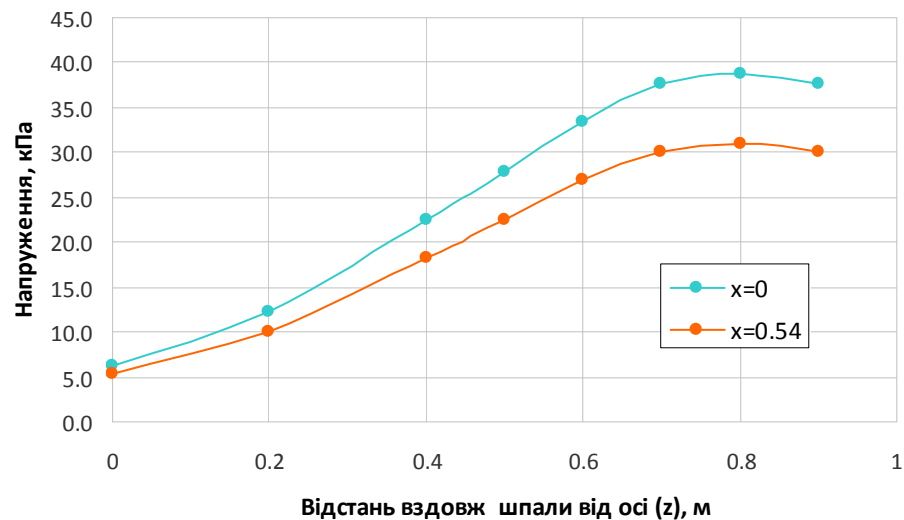


Рисунок 5.2 – Зміна напружень в щебені на глибині 40 см по довжині шпали

5.1.2 Порівняння результатів моделювання напруженого стану підрейкової основи з експериментальними даними

Маючи напруження від двох типів вагонів на двох відмітках глибини можна порівняти їх з відповідними, отриманими експериментально значеннями (див. табл. 4.1). Моделювання здійснювались для середніх розрахункових значень вертикальної сили, які були прийняті з урахуванням максимально вірогідних, розрахованих за формулою (2.28б), і склали {114,272; 115,660; 118,436; 119,824; 121,212; 122,322} кН для моторного вагону і {87,157; 88,216; 90,333; 91,391; 92,450; 93,297} кН для безмоторного відповідно до швидкостей руху $\{\leq 60; 80; 120; 140; 160; 176\}$ км/год, що не суперечить силам, отриманим експериментально (див. рис. 4.18-4.19).

Значення напружень, які отримані моделюванням, накладені на експериментальні результати, які показані у вигляді діапазону – від мінімального спостереженого значення до максимального з відміткою середньостатистичного (рис. 5.3-5.4).

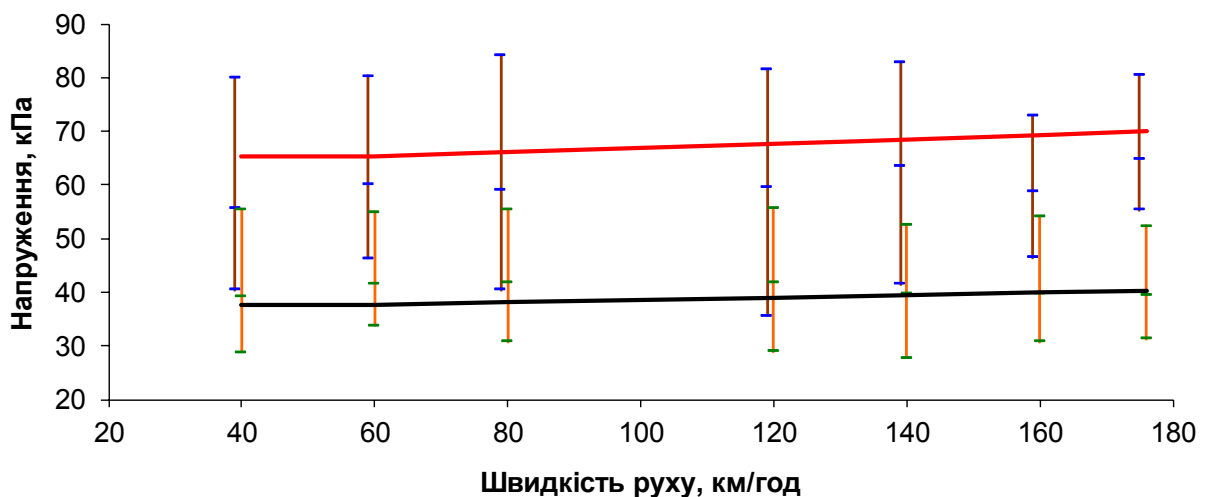


Рисунок 5.3 – Рівень напружень в щебені на глибині 20 і 40 см за результатами моделювання у порівнянні з діапазонами значень, отриманими експериментально, для *моторного* вагону

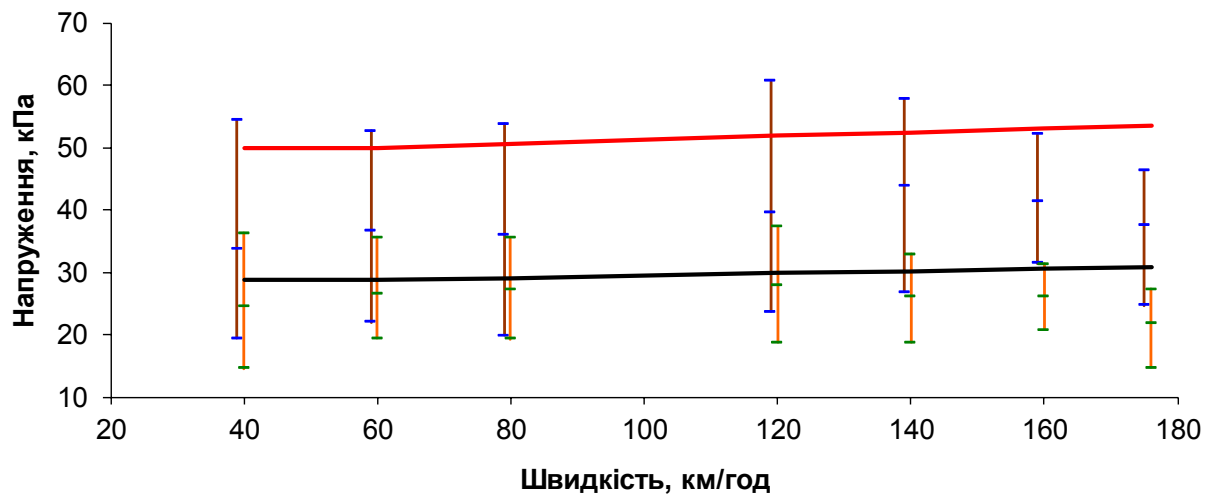


Рисунок 5.4 – Рівень напружень в щебені на глибині 20 і 40 см за результатами моделювання у порівнянні з діапазонами значень, отриманими експериментально, для *безмоторного* вагону

З рис. 5.3-5.4 можна зробити висновок, що результати моделювання не мають протиріч з експериментальними дослідженнями, як за абсолютними значеннями, так і за співвідношенням зміни напружень по глибині, *що підтверджує адекватність розробленої моделі для задач визначення напруженого стану підрейкового простору.*

5.2 Особливості сприйняття навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху

5.2.1 Умови реалізації повного прогину рейки

Розглянемо процес формування прогину рейки на прикладі моделювання миттєвого прикладання сили від колеса до рейки. Спочатку в рейці виникають стискаючі напруження, але дуже швидко (приблизно на 0,03-й мс) вони передаються на підкладку і далі на шпалу. На 0,09-й мс напруження від шпали починають передаватися до баласту. Майже одночасно з цим (на 0,1-й мс) навантаження від рейки починає передаватися

на перші суміжні шпали і далі по довжині рейки. Деформація підкладок приводить до перерозподілу напружень в рейці і надає початок її вигину. На 0,3-й мс шпала має вже повний контакт з баластом на половині своєї довжині, враховуючи як підошву шпали, так і її бокові поверхні. Баласт починає стискатися, що дає можливість рейці продовжити вигинатися. В процесі переходу фронту взаємодії від шпали до баласту площа їх взаємодії буде змінюватись у часі (зростати від точки до всієї поверхні підошви шпали). З першої миті такої взаємодії напруження почнуть поширюватися у товщі баласту, але швидкість їх поширення по поверхні баласту буде суттєво менше швидкості зростання площі, по якій напруження передаються від шпали на баласт. Це приводить до більш складного обрису фронту взаємодії у порівнянні з описом поширення у вигляді еліпсоїда. В залежності від товщини, стану, фізичних властивостей речовини баласту тощо, на 1,0...1,8-й мс напруження починають передаватися до земляного полотна. З ростом і поширенням пружних деформацій у земляному полотні відбувається останній перерозподіл напружень між шарами підрейкової основи і по проходженню ще певного часу, який залежить від властивостей ґрунту, рейка досягає остаточних параметрів вигину.

Таким чином, прогин рейки забезпечується деформацією всіх шарів, з яких складається підрейкова основа. Слід мати на увазі, що для «повного» прогину рейки деформації підрейкової основи повинні набрати відповідних значень не тільки безпосередньо по вертикальній вісі прикладання сили, а й по всій довжині рейки, що залучена до прогину. В залежності від модуля пружності підрейкової основи довжина відчутного прогину рейки складає декілька метрів.

Відповідно до швидкості поширення фронту взаємодії, з часом зростає глибина підрейкової основи, яка бере участь у формуванні прогину рейки, але, з іншого боку, деформації з глибиною зменшуються, що швидко зменшує їхній вплив на загальний прогин. Крім того, навіть вже здобуті значення деформацій на певних відмітках глибини не залишаються

постійними в часі, а носять коливальний (хоч і спрямований на швидке затухання) характер. Все це ускладнює критерій визначення такої розрахункової миті, коли можна вважати, що прогин рейки здобув повну реалізацію.

При проведенні чисельних розрахунків фіксувалася деформація підрейкової основи по осям декількох суміжних шпал – в точках сумісного прогину рейки і деформації підрейкової основи. В якості контрольної величини за прогином рейки визначався модуль пружності підрейкової основи. Якщо подальший розвиток прогину змінював модуль пружності не більше, ніж на 1-2 %, фіксувалося набуття «повного» прогину.

На рис. 5.5 показано зміну обрису фронту взаємодії в залізничній колії за результатами моделювання для ґрунту з модулем деформації 25 МПа. Вертикальна вісь на рисунку співпадає з віссю прикладання сили. Остання лінія показана для часу 26,5 мс після моменту прикладання навантаження, що для даного розрахункового варіанту відповідає умові «повного» прогину рейки. Деякі додаткові графічні матеріали для цього варіанту розрахунків наведені в Додатку Б – рис.Б.1-Б.3.

Для наведеного прикладу на рис. 5.6 показано співвідношення аналітичного прогину рейки за формулою (5.1) [20, 22] і прогинів підрейкової основи по осям шпал за результатами моделювання для сталого стану

$$z = \frac{Pk}{2U} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (5.1)$$

де P – вертикальна сила, що діє на рейку;

k – коефіцієнт відносної жорсткості;

U – модуль пружності підрейкової основи;

x – відстань по довжині рейки від точки прикладання сили.

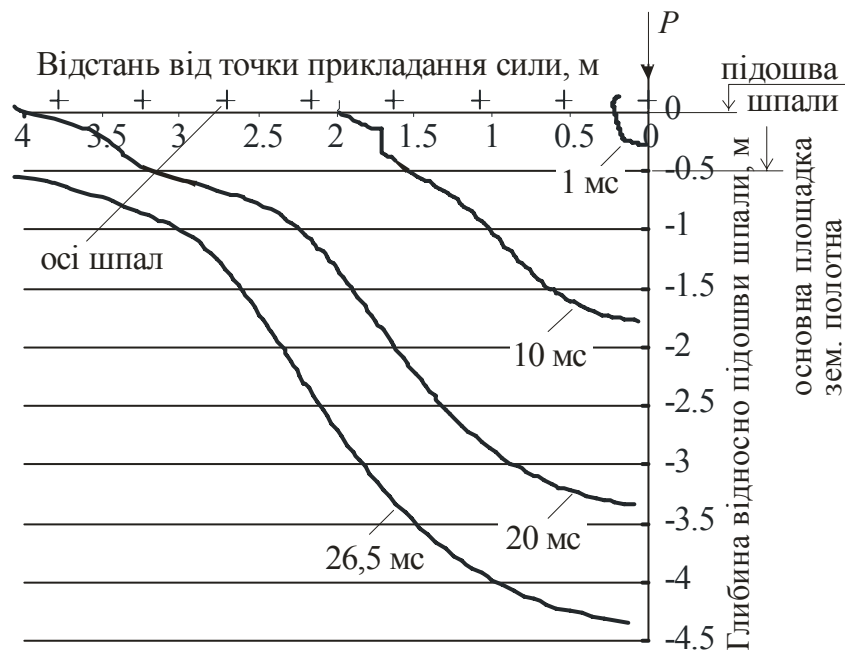


Рисунок 5.5 – Обрис фронту поширення в підрейковому просторі

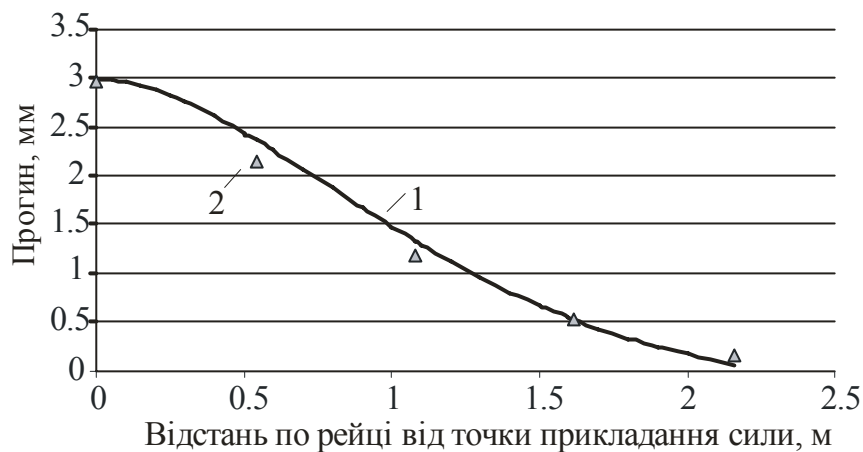


Рисунок 5.6 – Зміна прогину по довжині: 1 – аналітичний прогин рейки; 2 – прогин підрейкової основи за результатами моделювання

Якщо розглядати саме переміщення навантаження (рух колеса) по рейці, то невірно описувати процес прогину рейки в перерізі від нульового до максимального значення, виходячи з припущення, що саме у цьому перерізі знаходиться колесо весь час розвитку прогину. Для дослідження певного перерізу колії, слід враховувати, що прогин в ньому починається ще під час знаходження колеса на деякій відстані. При рушенні колеса далі від вибраного перерізу фронт хвилі пружної деформації продовжує

поширюватись. У випадку, коли швидкість руху поїзда суттєво менше за швидкість поширення області взаємодії, колесо знаходиться у зоні реалізованих деформацій.

Введемо позначення: $A(x)$ – множина точок напівпростору, що обмежені фронтом взаємодії достатнім для реалізації «повного» прогину z_n в точці x ; $B(x, t)$ – множина точок напівпростору, що обмежені фронтом взаємодії після її поширення відносно $A(x)$ за час t . Тоді межу швидкості руху, при якій буде встигати реалізуватися «повний» прогин, буде визначати вираз

$$z(V) = z_n : A(x + Vdt) \in B(x, dt). \quad (5.2)$$

Приклад розрахунку за виразом (5.2) для умовно великого значення dt показано на рис. 5.7. Так при швидкості руху V_1 (лінія 2) прогин встигає сформуватися повністю, а при швидкості V_2 (лінія 4) вже не встигає.

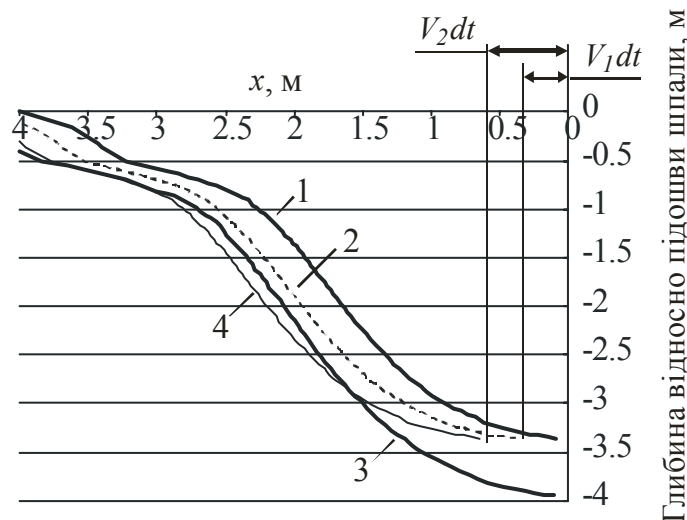


Рисунок 5.7 – Обриси фронтів поширення:

1 – $A(0)$; 2 – $A(V_1 dt)$; 3 – $B(0, dt)$; 4 – $A(V_2 dt)$

Таким чином, розрахунки показують, що може мати місце рух з настільки високими швидкостями, що прогин рейки не зможе встигати досягнути значень, які очікуються за статичними схемами. Саме про такі процеси говориться, наприклад, в роботі [75, 76, 78]. Однак, все ж такі це

досить великі швидкості руху, що пояснюється швидким перерозподілом навантаження по поверхні ґрунту роботою спочатку шпал, а потім баласту.

Використовуючи просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, була визначена швидкість руху, при досягненні якої прогин рейки не встигає набуті «повного» значення. Розглядались різні варіанти вихідних даних. Результати розрахунків наведено в табл. 5.1. При цьому конструкція колії була представлена залізобетонними шпалами з відстанню 0,54 м між осями і щебеневим баластом товщиною 0,5 м під шпалою.

Таблиця 5.1 – Швидкості руху, при яких не встигає реалізуватися повний прогин рейки

Модуль деформації, МПа		Модуль пружності підрейкової основи (U), МПа	Швидкості руху, км/год
баласту (E_6)	ґрунту ($E_{гр}$)		
100	7	11	215
	10	15	250
	15	21	315
	20	26	360
	25	32	395
200		40	405
	30	44	440
	40	57	485
	50	64	530

При русі поїзда по залізничній колії з достатньо великою швидкістю руху підрейкова основа може й не встигати реалізувати деформації по всій

протяжності формування прогину рейки. Це призводить до появи ефекту, коли рейка не встигає прогнутися повністю. Навіть при ґрунтах з невеликими модулями деформації (7...10 МПа) швидкості руху для появи такого ефекту складають 215...250 км/год відповідно. На рівень цієї швидкості, окрім характеристик ґрунту (хоча вони й залишаються визначальними), впливають також властивості шарів над ґрунтом.

При складанні земляного полотна з ґрунтів, які мають модуль деформації достатній для забезпечення загального модуля пружності підрейкової основи на рівні 40...50 МПа і більше (що закладається в більшості розрахунків колії на міцність) ефект не реалізації прогину рейки може з'явитися при доволі великих на сьогоднішні рівнях швидкості руху – 350...400 км/год і вище.

5.2.2 Аналітичне визначення обрису фронту взаємодії в підрейковій основі

Одним з основних принципів, які дають змогу моделювати напружено-деформований стан залізничної колії з просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, є визначення і врахування обрису області простору, що приймає участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку. Крім задач визначення динамічних показників напружень або деформацій, які потребують покрокового точного визначення просторового обрису поверхні фронту, існують інші напрямки розрахунків, для яких достатньо визначити загальні характеристики поширення або ступень поширення на момент виконання заданих граничних умов тощо. Це задачі обґрунтування місця встановлення (або інших характеристик) захисних шарів (або споруд), розмірів розрахункового простору при моделюванні залізничної колії, наприклад, методом скінченних елементів та ін. В такому разі достатньо мати можливість аналітичного розрахунку обрису простору взаємодії за певними умовами.

Для одношарової конструкції, яку за розміру можна вважати півпростором, рішення такої задачі в полярних координатах досягається за формулою (3.3), з попереднім застосуванням формул (3.2) і (3.4). Тобто маючи фізичні характеристики шару, а саме модуль деформації, щільність, коефіцієнт Пуассона, можна визначити довжину радіус-вектору від точки прикладання сили на час розрахунку в потрібному напрямку α . Геометричний обрис, отриманий в результаті, буде мати форму еліпсоїда (овалу для плоскої задачі).

Для залізничної колії в цілому, такий підхід може бути прийнятним (з невеликою похибкою) для баластного шару. Розташовані над ним елементи верхньої будови колії змінюють обрис фронту поширення, але, враховуючи велику швидкість проходження просторових хвиль в них, у порівняння з баластом, для більшості задач цю похибку можна вважати прийнятною.

Обрис фронту поширення в земляному полотні має більш складну форму (наприклад, див. рис. 5.5). Для його визначення аналітичним методом, автором отримано наступну формулу:

$$r(\alpha, t) = \frac{\varphi t C_{l(\text{зн})}}{\sqrt{\varphi^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}} + \frac{h_{\text{б}}}{\cos \alpha} \left(1 - \sqrt{\frac{E_{\text{зн}} \rho_{\text{б}}}{E_{\text{б}} \rho_{\text{зн}}}} \right), \quad (5.15)$$

де $C_{l(\text{зн})}$ – поздовжня швидкість поширення хвилі в земляному полотні – формула (3.2);

φ – коефіцієнт відношення поперечної швидкості до поздовжньої для земляного полотна – формула (3.29);

$h_{\text{б}}$ – товщина шару баласту;

$E_{\text{б}}, E_{\text{зн}}$ – модуль деформації баласту і земляного полотна відповідно;

$\rho_{\text{б}}, \rho_{\text{зн}}$ – щільність речовини баласту і земляного полотна відповідно.

Параметр φ визначається тільки коефіцієнтом Пуассона. Для більшості сипучих речовин баласту і ґрунту можна прийняти, що його значення дорівнює 0,3. Тоді формулі (5.2а) можна скоротити кількість вихідних даних:

$$r(\alpha, t) = \frac{0,62t\sqrt{E_{\text{зп}}}}{\sqrt{\rho_{\text{зп}}(1-0,71\cos^2\alpha)}} + \frac{h_6}{\cos\alpha} \left(1 - \sqrt{\frac{E_{\text{зп}}\rho_6}{E_6\rho_{\text{зп}}}} \right). \quad (5.16)$$

При необхідності, можна відтворити результат в декартовій системі координат:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \alpha; \\ y &= r \cos \alpha; \end{aligned} \right\}. \quad (5.17)$$

В отриманих формулах прийнято, що рівень $y=0$ відповідає поверхні баласту.

На рис. 5.21 наведені обрис фронту взаємодії, отриманий за результатами моделювання на часовій відмітці 0,03 с, і за розрахунками з використанням формул (5.16) і (5.17). Використані вихідні дані наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для розрахунку обрису фронту взаємодії в земляному полотні

E_6 , МПа	$E_{\text{зп}}$, МПа	ρ_6 , кг/м ³	$\rho_{\text{зп}}$, кг/м ³	h_6 , м
200	25	1600	1400	0,5

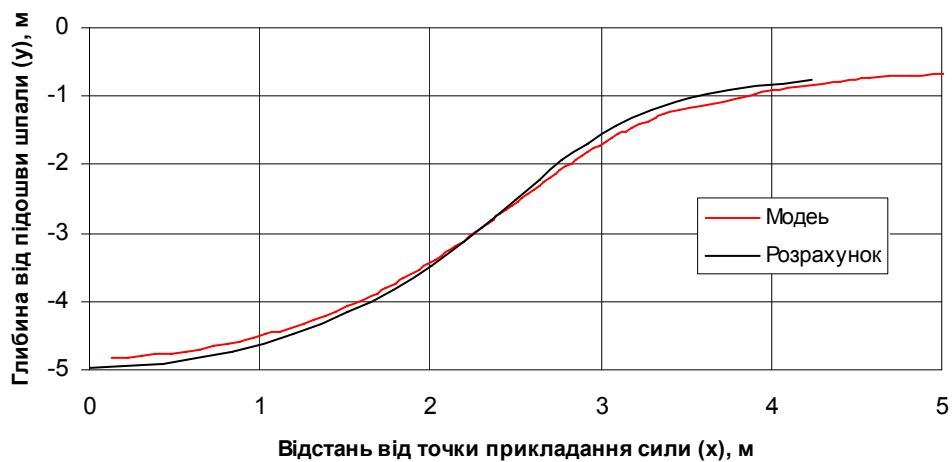


Рисунок 5.21 – Обрис фронту взаємодії в земляному полотні, отриманий за результатами моделювання і за аналітичним розрахунком

5.3 Визначення характеристик динамічних прогинів рейки

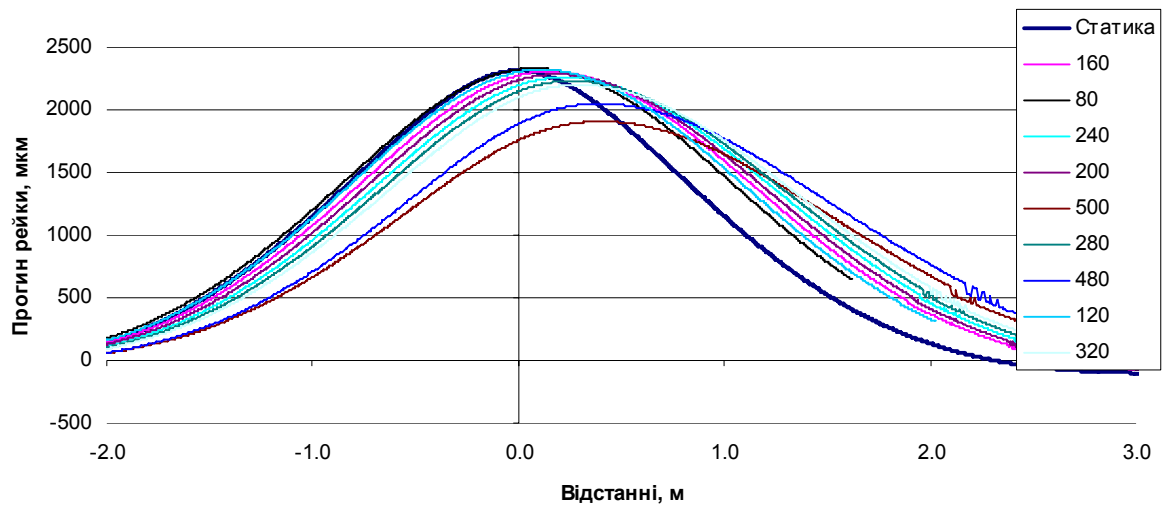
Для вирішення більшості задач напружено-деформованого стану залізничної колії важливою складовою є можливість прикладати динамічне рухоме зовнішнє навантаження, тобто силу, яка буде змінювати в часі не тільки своє значення, а й координати прикладання. Розроблена просторова модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності дозволяє виконувати такі розрахунки.

Розглянемо, як буде змінюватися прогин рейки в дослідному перерізі під час проходження колеса з відстані, коли тиск ще відсутній, до відстані, коли тиск вже відсутній. Отриманий обрис прогину рейки для зручності і стислості тут і далі будемо називати *динамічним*, маючи на увагу, що його отримано з урахуванням динамічності прогину підрейкової основи. Для порівняння, обрис вигину, отриманий за відомими формулами статичного прогину балки від навантаження тотожного динамічному, що відповідає гіпотезі Н. П. Петрова, будемо називати *статичним*. Звертаємо увагу, що в «Правилах розрахунку залізничної колії на міцність» [22] використовується дещо інше визначення динамічного прогину рейки.

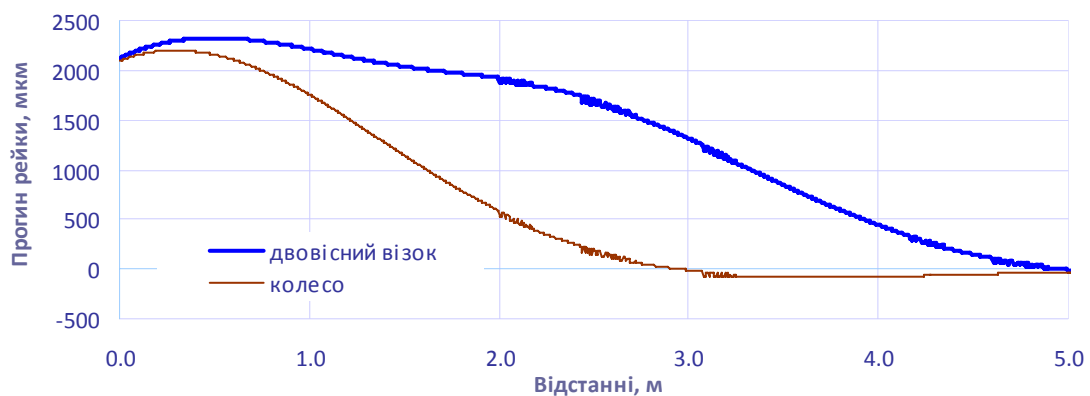
Для числового прикладу розглянемо наступну конструкцію колії: ділянка з 17-ти залізобетонних шпал, баласт щебеневий (модуль деформації 200 МПа) товщиною 0.5 м від підшви шпали, ґрунт з модулем деформації 25 МПа. Прийняті дані відповідають встановленому за попередніми розрахунками (див. табл. 5.1) загальному модулю пружності підрейкової основи 32 МПа. Досліджується переріз, що знаходиться посередині ділянки (9-я шпала). Сила величиною 145.5 кН починає діяти на відстані 2.65 м від дослідного перерізу і рухається з заданою швидкістю. Додаткові матеріали для цього варіанту розрахунку наведено в Додатку Б. В табл. Б.1 надано докладний приклад обрису прогину рейки для варіанту швидкості руху 160 км/год.

Розрахунки виконано для швидкостей руху від 80 до 320 км/год включно з кроком 40 км/год. Результати розрахунків показано на рис. 5.8.

Для порівняння на рисунку також показаний обрис статичного прогину рейки розраховано за формулою (5.1).



а)



б)

Рисунок 5.8 – Прогини рейки для різних швидкостей руху ($U = 32$ МПа):

а) навантаження однією силою при різних швидкостях руху; б) для руху поодинокого колеса і двовісного візка при швидкості 320 км/год;

З рис. 5.8а видно, що при збільшенні швидкості руху спостерігається зміна обрису прогину рейки, що є наслідком прояву дисипативних властивостей шарів підрейкової основи. Але ці зміни не великі, і такі характеристики, як максимальне значення прогину і його довжина залишаються майже постійними. Тому напруження, які виникають в підрейковій основі під час цього процесу, можуть відрізнятися швидкостями

реалізації але за максимальними значеннями тотожні статичним. Це підтверджує, що значення осьових максимальних напружень, які ґрунтуються на тотожності характеристик динамічного і статичного прогинів, не будуть суттєво відрізнятися при застосуванні квазістатичних методів розрахунків.

Додатково на рис. 5.8а показано обриси прогину рейки для швидкостей 480 і 500 км/год. При яких, відповідно до результатів наданих у табл. 5.1, вже не буде встигати реалізовуватися «повний» прогин рейки. Як видно, і такий засіб моделювання підтверджує зменшення величини максимального прогину.

На рис. 5.8б показані динамічні прогини рейки порівнянні руху поодинокого колеса і двовісного візка для швидкості 320 км/год. Урахування дії другого колеса не приводить ні до відчутного збільшення максимального прогину (в перерізі під колесом), ні до появи додаткових ефектів в сенсі урахування динаміки прогину підрейкової основи. Більш детально одночасна дія декількох коліс була розглянута в другому розділі дисертації на основі існуючих аналітичних методів (див. п. 2.3.3).

Для подальшого аналізу було зроблено аналогічні розрахунки для інших варіантів вихідних параметрів конструкції колії. На рис. 5.9 і 5.10 показані динамічні прогини рейки для конструкцій колії з узагальненими значеннями модуля пружності підрейкової основи 15 і 40 МПа відповідно.

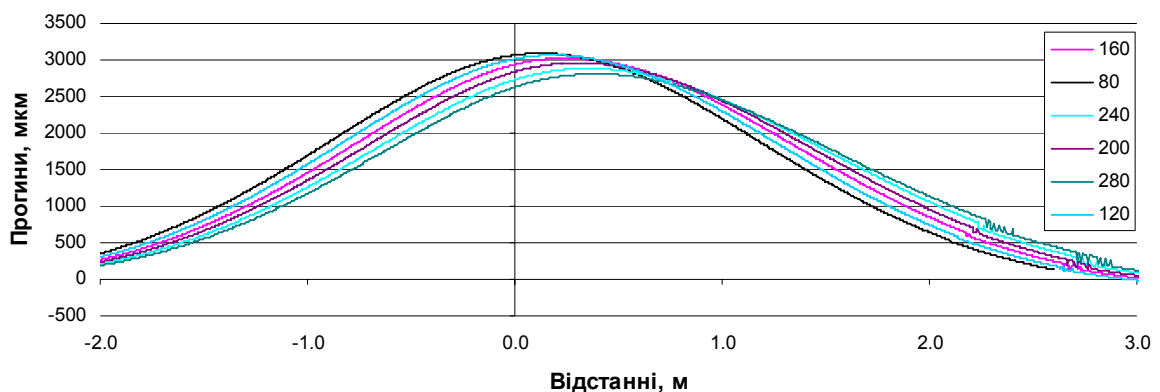


Рисунок 5.9 – Прогини рейки для різних швидкостей руху ($U=15$ МПа)

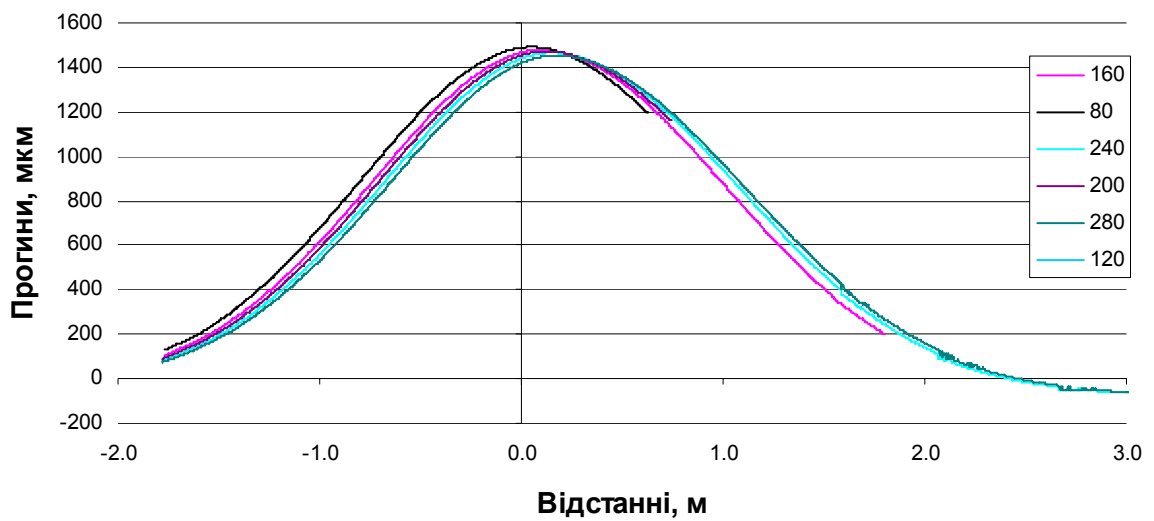


Рисунок 5.10 – Прогини рейки для різних швидкостей руху ($U = 40$ МПа)

5.4 Введення залізничної колії в моделі руху екіпажів

Сьогодні не можна рекомендувати одну математичну модель і, навіть, один принцип моделювання для вирішення усього різноманіття задач взаємодії колії і рухомого складу. Навпаки, саме постановка задачі повинна визначати допустимі припущення, обов'язкові фактори, можливу точність вихідних даних та необхідну точність отриманих результатів та інші характеристики, що й визначають вибір моделі, адекватної для даного випадку.

Досить важко отримати гарні результати у спробі поєднати моделювання рухомого складу і роботи залізничної колії. Тому найчастіше застосовуються не загальні моделі, а поетапне моделювання процесів в декількох різнозначних моделях. Так, в моделях рухомого складу з детальним врахуванням динамічних процесів в екіпажі і максимальним спрощенням залізничної колії отримують сили, що діють на колії. Далі, такі сили стають вихідним навантаженням (як правило спрощеним до засобів прикладання цих сил) у моделях з деталізацією роботи залізничної колії.

Такий підхід послідовного застосування двох принципово різних моделей було використано, наприклад, в роботах [70, 71] та ін.

Моделі рухомого складу, як правило, представляють собою відповідні до поставленої задачі варіації системи рівнянь, складених за принципом Лагранжа-д'Аламбера (рис. 5.11). Щодо введення до них залізничної колії, то тут можуть бути деякі варіанти, але, в будь-якому разі, вони повинні вкладатися в загальний підхід складання системи з окремих абсолютно твердих тіл з масою та зв'язками між собою.

Один з варіантів описує залізничну колію як нескінченну балку, яка лежить на пружній безінерційній основі – модель Вінклера. Така модель є основою багатьох статичних розрахункових схем і для багатьох задач є адекватною. Але така система буде мати нескінченну кількість ступенів вільності і є не дуже зручною для включення до моделей рухомого складу. Альтернативою є модель Власова, яка дозволяє виразити переміщення точок балки (рейки) і підрейкової основи через переміщення точок контакту коліс і рейок.

В найпростішому вигляді це може бути жорсткий зв'язок колеса з залізничною колією, рис. 5.11а. Тоді жорсткість такої опори, віднесеною до одного колеса, можна визначити за формулою

$$k_k = \frac{2U}{k}, \quad (5.3)$$

де U – модуль пружності підрейкової основи;

k – коефіцієнт відносної жорсткості.

Такий варіант застосовується зарідко. Відсутність дисипативного зв'язку робить систему надто чутливою до розгойдування: навіть за рахунок накопичення мінімальних похибок розв'язок рівнянь «тривалий» розрахунок може привести до виникнення незатухаючих коливань.

У більшості випадків застосовується варіант, коли кожне колесо має жорстко-дисипативний зв'язок з приведеною частиною залізничної колії – рис. 5.11б.

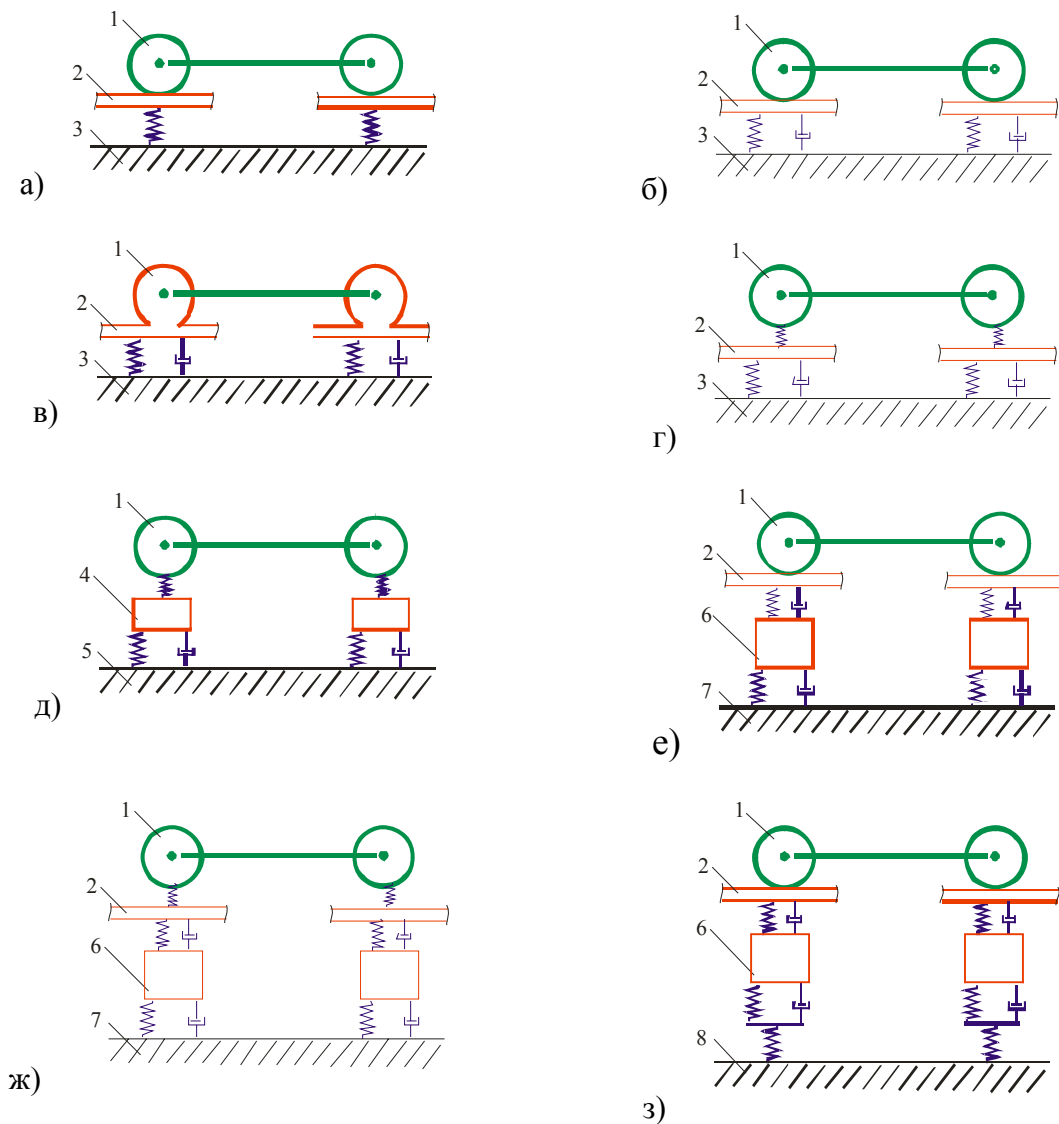


Рисунок 5.11 – Варіанти введення залізничної колії в модель на основі системи рівнянь за принципом Лагранжа-д'Аламбера: 1 – колесо; 2 – рейка; 3 – підрейкова основа; 4 – умовний об'єкт з масою колії, приведеною до одного колеса; 5 – нерухома основа; 6 – шпала; 7 – підшпальна основа; 8 – підбаластна основа

На сьогодні поширюються тенденція врахування інертності колії, тобто колія (або її окремі елементи) повинна мати масу, що робить її цільним об'єктом системи коливання мас і дає змогу деталізувати на окремі складові. Під масою мається на увазі так звана приведена маса – тобто та, що приймає участь у взаємодії з колесом. Іноді під нею мають на увазі масу рейки, іноді – масу верхньої будови колії (знов таки приведеної до одного колеса).

Зрозуміло, що в будь-якому разі ця маса є умовною, її значення повинно змінюватися в процесі взаємодії, але системи, складені за принципом Лагранжа-д'Аламбера унеможливають використання змінних мас. Крім того, залізнична колія все ж таки працює на пружні деформації, які не можуть бути повністю ототожені переміщенням центрів мас абсолютно твердих тіл.

В залежності від ступеня деталізації підсистеми «залізнична колія» можливі варіанти:

- враховується приведена маса рейки; приймається, що рейка і колесо, як об'єкт з їх сумарною масою, має жорстко-дисипативний зв'язок з підрейковою основою, рис. 5.11в;

- враховується приведена маса рейки, яка має жорстко-дисипативний зв'язок з підрейковою основою; для відокремлення маси колеса від рейки між ними встановлюється жорсткій зв'язок (з великим числовим значенням), рис. 5.11г;

- враховується приведена маса колії, яка має жорстко-дисипативний зв'язок з основою, рис. 5.12д;

- враховується маса шпали (що взаємодіє з колесом), яка має жорстко-дисипативний зв'язок з підшпальною основою з одного боку і з рейкою з іншого (як правило невагомою (рис. 5.11е), хоча можуть бути варіанти відокремлення й маси рейки (рис. 5.11ж);

- враховується маса шпали (що взаємодіє з колесом), яка має жорстко-дисипативний зв'язок з рейкою з одного боку і з баластом з іншого, який має жорсткий зв'язок з підбаластною основою, рис. 5.12е.

Наведена класифікація розроблена автором на основі робіт [20, 104, 192-194] та ін.

З точки зору моделювання руху екіпажу варіанти від 5.11е і далі не стільки уточнюють результати розрахунків, скільки ускладнюють загальну систему рівнянь і можуть бути тотожно приведені до варіанту 5.12д або, навіть, ще простіших. Така деталізація має місце при спробі моделювати саме

роботу залізничної колії, але, як вже доводилось раніше, для більшості задач це не є принциповим і доцільним рішенням, а тому в межах даної роботи далі не розглядатиметься.

Як показали наведені раніше розрахунки прогинів рейки, параметри жорсткості залізничної колії залежать не тільки від характеристик шарів, з яких складається підрейкова основа, а й від швидкості руху поїзда. Отримані розрахунки динамічних прогинів рейки для різних варіантів вихідних даних (наприклад, рис. 5.8-5.10) дають змогу встановити відповідні характеристики залізничної колії для моделей, складених з системи рівнянь за принципом Лагранжа-д'Аламбера. Схожа задача була вирішена проф. О. М. Даренським в роботі [195], в якій на основі аналітичних розрахунків була визначена жорсткість опор, приведена до одного колеса, для зони рейкового стику в умовах експлуатації промислового транспорту.

Таким чином, задача складається з визначення таких характеристик колії як приведена маса, коефіцієнт жорсткості, коефіцієнт дисипації. Для розв'язання задачі розглянемо наступну розрахункову схему, рис. 5.12.

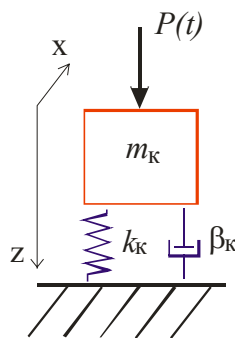


Рисунок 5.12 – Розрахункова схема роботи колії, приведеної до одного колеса

Робота колії, приведеної до одного колеса, розглядається як система з однією ступеню вільності, що складається з маси, яка має жорсткій (k_k) і дисипативний (β_k) зв'язок з основою. До системи прикладена зовнішня сила, змінна у часі. Така розрахункова схема тотожна представленню залізничної

колії в моделях Лагранжа-д'Аламбера за варіантом 5.11д, але, при необхідності, може бути приведена і до інших варіантів.

Диференційне рівняння для опису коливань такої системи буде мати вигляд

$$m_k \frac{d^2 z}{dt^2} + \beta_k \frac{dz}{dt} + k_k z = P(t). \quad (5.4)$$

Якщо інтегрувати по довжині пройденого шляху, то

$$m_k V^2 \frac{d^2 z}{dt^2} + \beta_k V \frac{dz}{dt} + k_k z = P(x), \quad (5.5)$$

де V – швидкість руху.

Рівняння (5.5) приводиться до класичного виду

$$\frac{d^2 z}{dx^2} + 2r \frac{dz}{dx} + \omega^2 z = \frac{P(x)}{H}. \quad (5.6)$$

Тоді

$$r = \frac{\beta_k}{2m_k V}; \quad (5.7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_k}{m_k V^2}}; \quad (5.8)$$

$$H = m_k V^2. \quad (5.9)$$

Силу приймемо у виразі

$$P(x) = A e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (5.10)$$

де A – визначає амплітуду сили.

Тоді розв'язок рівняння (5.6) буде

$$z(x) = e^{-rx} (C_1 \cos \omega x + C_2 \sin \omega x) + \frac{A}{m_k V^2} \frac{\left[(\omega^2 + 2k_k^2 - 4rk_k) \cos k_k x + (\omega^2 - 2k_k^2) \sin k_k x \right] e^{-k_k x}}{-4rk_k \omega^2 + \omega^4 + 4k_k^4 + 8r^2 k_k^2 - 8rk_k^3} \quad (5.11)$$

Або в остаточному виді

$$z(x) = C e^{-rx} (\cos \omega x + \sin \omega x) + \frac{A}{m_k V^2} \frac{\left[(\omega^2 + 2k_k^2 - 4rk_k) \cos k_k x + (\omega^2 - 2k_k^2) \sin k_k x \right] e^{-k_k x}}{-4rk_k \omega^2 + \omega^4 + 4k_k^4 + 8r^2 k_k^2 - 8rk_k^3} \quad (5.12)$$

де

$$C = \frac{A}{m_k V^2} \left(\frac{k}{2U} - \frac{\omega^2 + 2k_k^2 - 4rk_k}{-4rk_k \omega^2 + \omega^4 + 4k_k^4 + 8r^2 k_k^2 - 8rk_k^3} \right). \quad (5.13)$$

Прийmemo, що колесо проходить шлях від одної міжшпальної осі до іншої, рис. 5.13, а потім процес циклічно повторюється. Такий підхід відповідає як моделям, в яких рух екіпажа (колеса) по колії є умовним (положення колеса відносно колії не змінюється в локальній системі координат, а рух відносно колії враховується прикладанням відповідних зовнішніх сил (прискорень, обмежень), так і моделям, в яких рух по колії задається в явному вигляді з урахуванням зміни положення колеса по довжині колії.

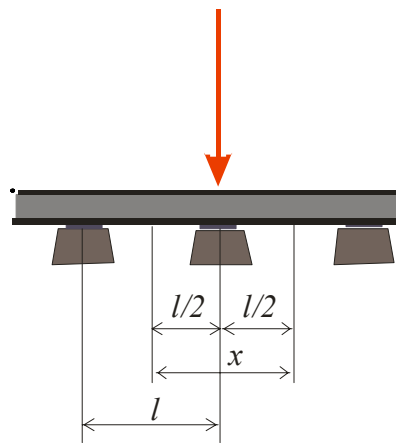


Рисунок 5.13 – Межі вибірки для залежності прогину від сили

За результатами моделювання динамічного прогину рейки (наприклад, рис. 5.8-5.10) можна встановити залежність прогину рейки від прикладеної сили. Як зазначено раніше, така залежність буде визначатися на ділянці $x \in \left[0 \pm \frac{l}{2}\right]$, де l – відстань між осями шпал. Результати такої обробки даних, отриманих при моделюванні, показані на рис. 5.14-5.16 для ділянок з узагальненими значеннями модуля пружності підрейкової основи 21, 32 і 57 МПа відповідно. На графіках показані вибірково результати для декількох рівнів швидкостей руху, а також результати за статичної розрахунковою схемою (див. формулу (5.1)). Це дає змогу оцінити нелінійність процесу. Для

можливості візуального порівняння, вертикальні осі показані в різних межах, але в однаковому масштабі (з ціною клітки в 0.1 мм).

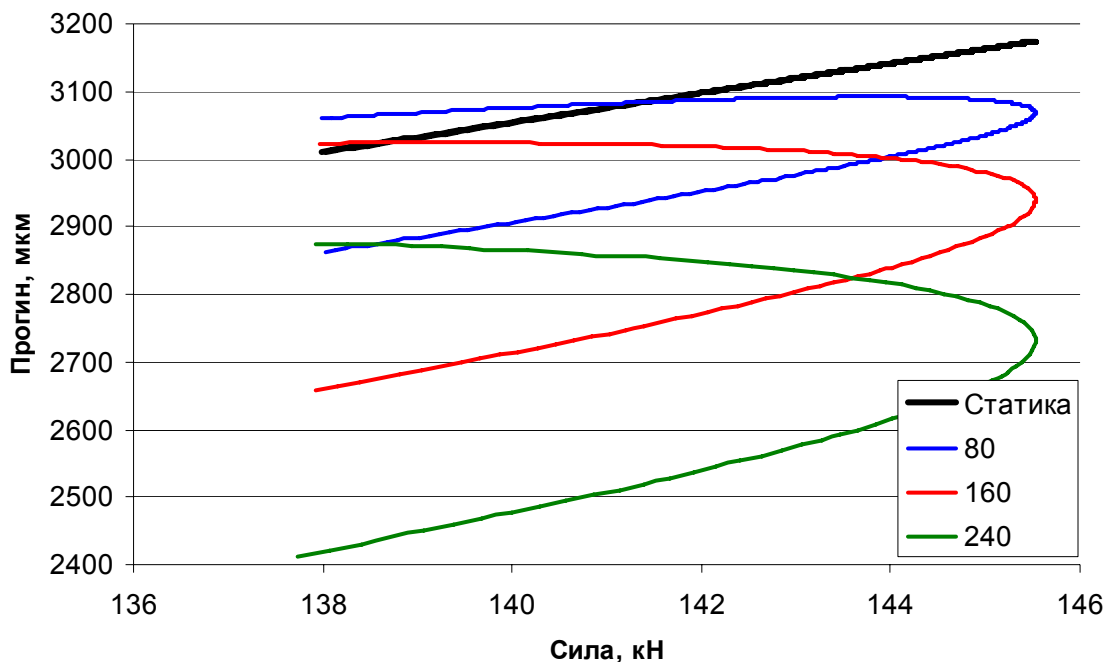


Рисунок 5.14 – Результати навантаження колії за моделюванням для ділянки з модулем пружності підрейкової основи 21 МПа

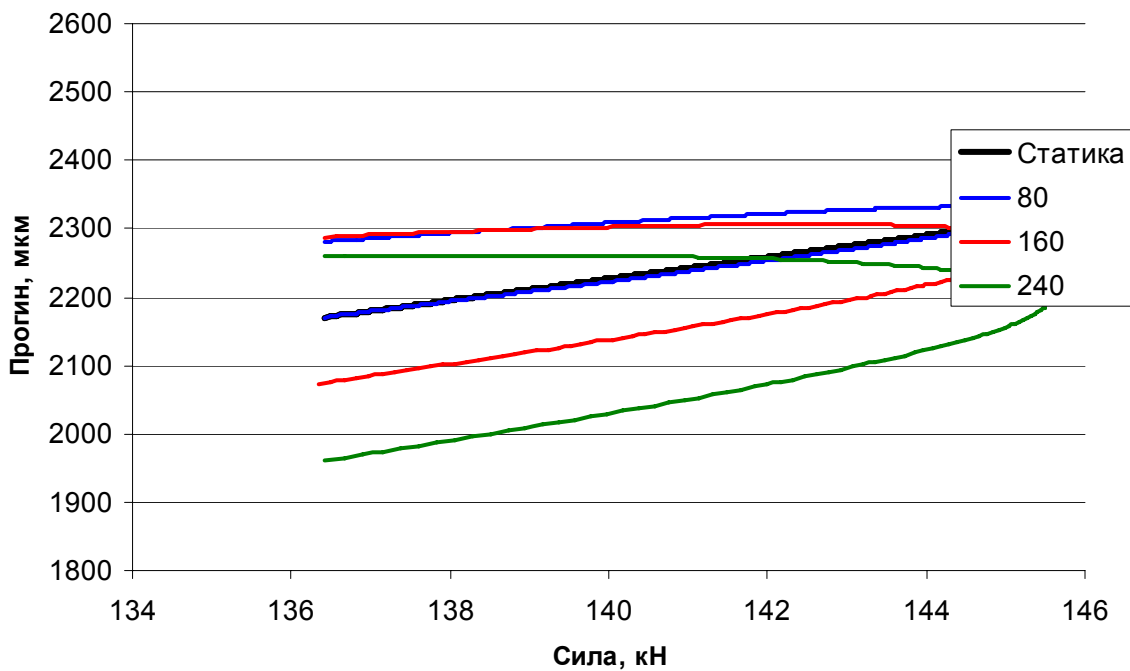


Рисунок 5.15 – Результати навантаження колії за моделюванням для ділянки з модулем пружності підрейкової основи 32 МПа

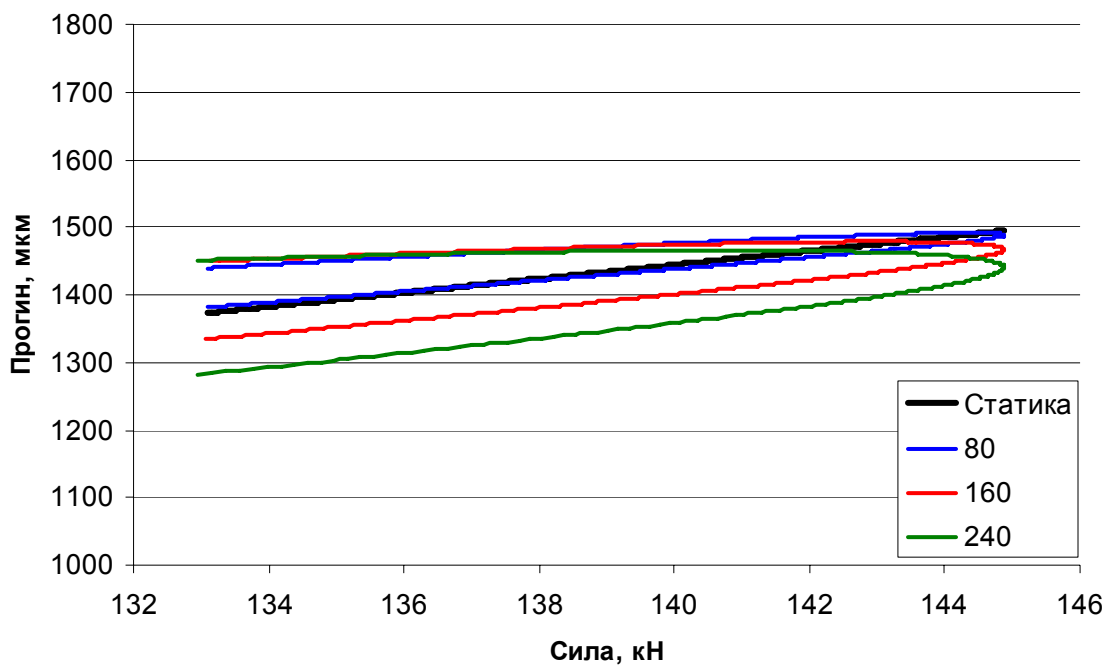


Рисунок 5.16 – Результати навантаження колії за моделюванням для ділянки з модулем пружності підрейкової основи 57 МПа

Формула (5.12) показує аналітичну залежність прогину від сили. Таким чином, характеристики колії можуть бути визначені в результаті апроксимації масиву даних, отриманих в результаті моделювання (Z_m), функцією (5.12). Алгоритм апроксимації:

$$\left. \begin{aligned} z &= f(k_k, \beta_k, m_k, P); Z_m = \{z_{m(i)} = f(P)\}; R = \sum_i (z_{m(i)} - z)^2; \\ \exists k_k \in (k_{k(\min)}; k_{k(\max)}), \exists \beta_k \in [0; \beta_{k(\max)}), \exists m_k \in [0; m_{k(\max)}): R \rightarrow \min; \\ k_k &\neq k_{k(\min)}; k_k \neq k_{k(\max)}; \beta_k \neq \beta_{k(\max)}; m_k \neq m_{k(\max)} \end{aligned} \right\}. \quad (5.14)$$

Результати розрахунків зведені у табл. 5.2. Вони дають змогу обґрунтовано задавати характеристики залізничної колії для моделювання рухомого складу за принципом Лагранжа-д'Аламбера.

Таблиця 5.2 – Характеристики залізничної колії в залежності від модуля пружності підрейкової основи і швидкості руху

Модуль пружності підрейкової основи, МПа	Показник	Швидкість руху, км/год						
		80	120	160	200	240	280	
21	Жорсткість, кН/м	47400	48200	49500	51200	53200	55300	
	Дисипація, кН·с/м	100	70	60	40	40	40	
32	Жорсткість, кН/м	62600	63100	63900	65000	66200	67700	
	Дисипація, кН·с/м	130	80	70	60	50	50	
57	Жорсткість, кН/м	97200	97900	98600	99400	100400	101800	
	Дисипація, кН·с/м	210	160	110	90	80	70	

5.5 Аналіз напружено-деформованого стану безбаластної конструкції залізничної колії

В розділі 1 (п. 1.3) даної роботи автором було проаналізовано світовий досвід застосування на ділянках швидкісного й високошвидкісного руху безбаластних конструкцій залізничної колії. Серед іншого, виникає витання оцінки напружено-деформованого стану таких конструкцій. Необхідність використання запропонованої моделі буде виникати і при вирішенні питань порівняння різних варіантів безбаластної конструкції колії, при встановленні умов експлуатації, в тому числі допустимих швидкостей руху, призначенню посилюючих елементів конструкції верхньої й нижньої будови колії.

Розроблена модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності не має протиріч для її застосування в тому числі для

розрахунків напружень і деформацій в елементах безбаластної залізничної колії.

Розглянемо такий підхід моделювання для безбаластної конструкції Rheda [189, 199]. На рис. 1.3 наведені основні геометричні розміри. Приклад формування в моделі підрейкової основи безбаластної конструкції колії Rheda показаний на рис. 5.17. Фотографічне зображення конструкції показано на рис. 5.18 [198].

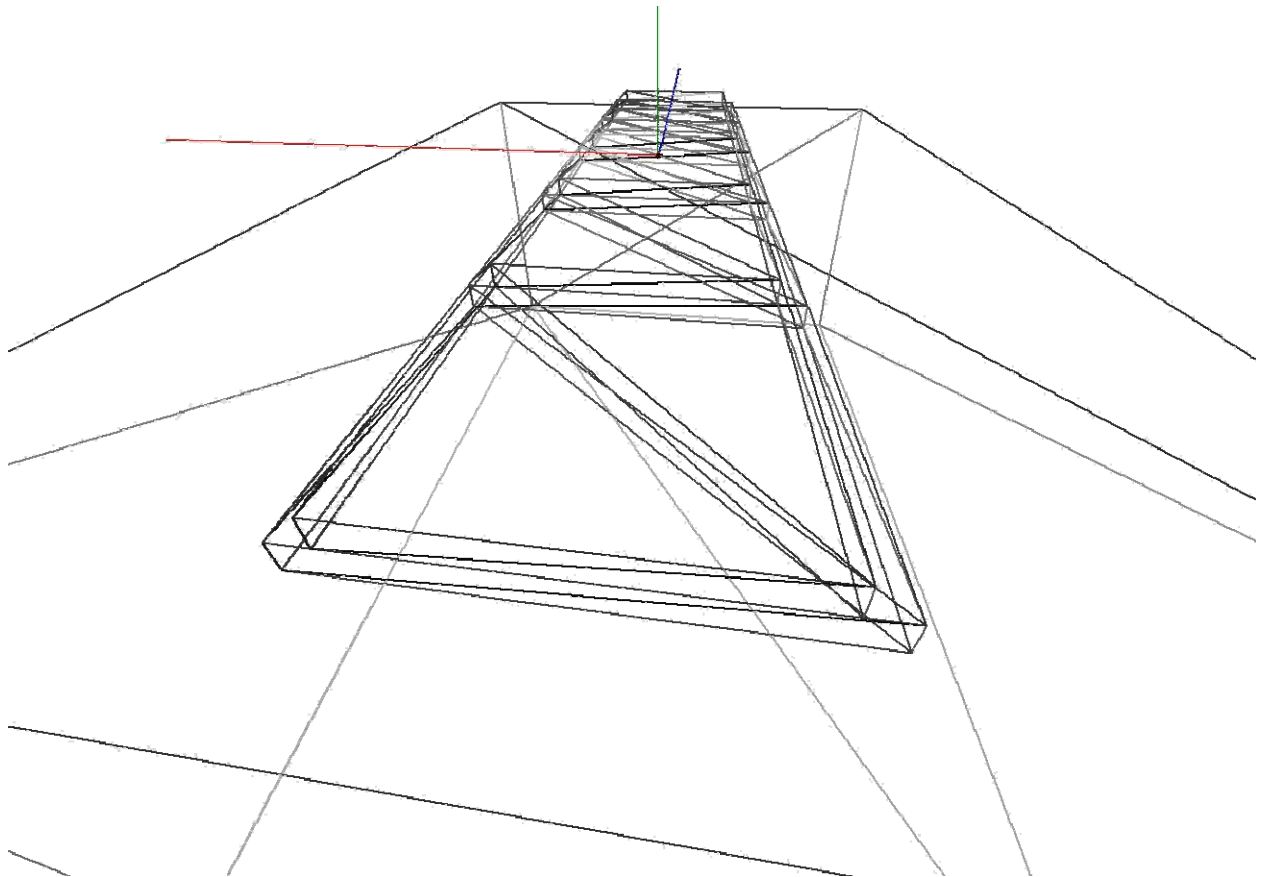


Рисунок 5.17 – Приклад формування в моделі підрейкової основи безбаластної конструкції колії

Для можливості подальшого порівняння з вже наведеними результатами моделювання для ділянок залізничної колії на баласті в якості навантаження приймемо значення розрахункової сили 118 кН. Враховуючи, що безбаластна конструкція Rheda може розміщуватися безпосередньо на ґрунті, безперечно, що саме шар ґрунту буде найбільш вразливим елементом за критеріями міцності. На рис. 5.19 наведені результати розрахунків у

вигляді розподілення напружень під плитою в шарі ґрунту (модуль деформації ґрунту 25 МПа). Результати показані для перерізу глибиною 40 см і шириною $\pm 0,9$ м, де $x=0$ – вісь колії; сили прикладало в точках з координатами $x=\pm 0,8$ м.



Рисунок 5.18 – Реальний вигляд безбаластної конструкції колії Rheda [198]

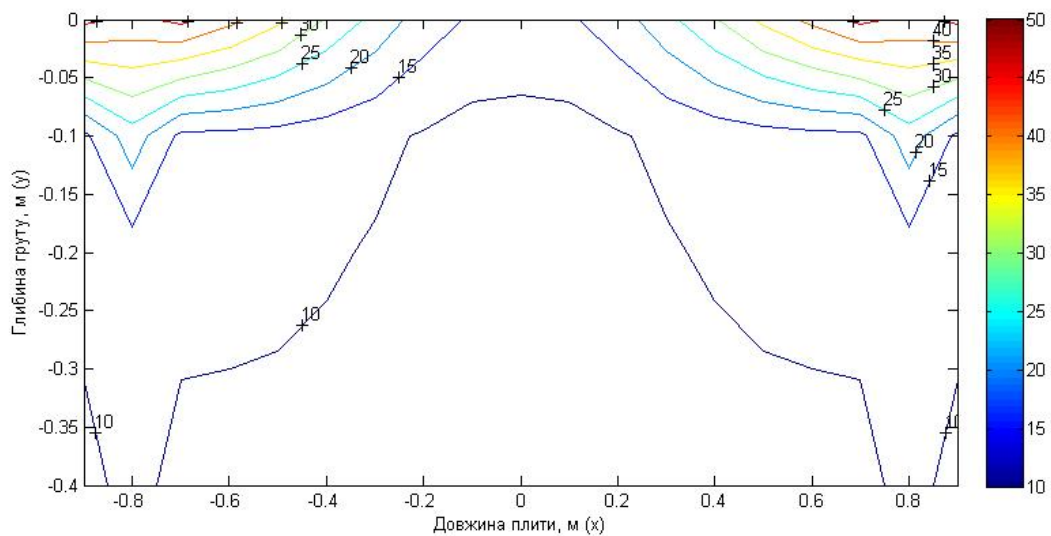


Рисунок 5.19 – Розподілення напружень (кПа) в ґрунті під плитою безбаластної конструкції колії

Для порівняння на рис. 5.20 наведено аналогічне розподілення напружень для конструкції залізничної колії на баласті (розрахункова сила 118 кН, рейки Р65, залізобетонні шпали, баласт товщиною 0,5 м, ґрунт з модулем деформації 25 МПа).

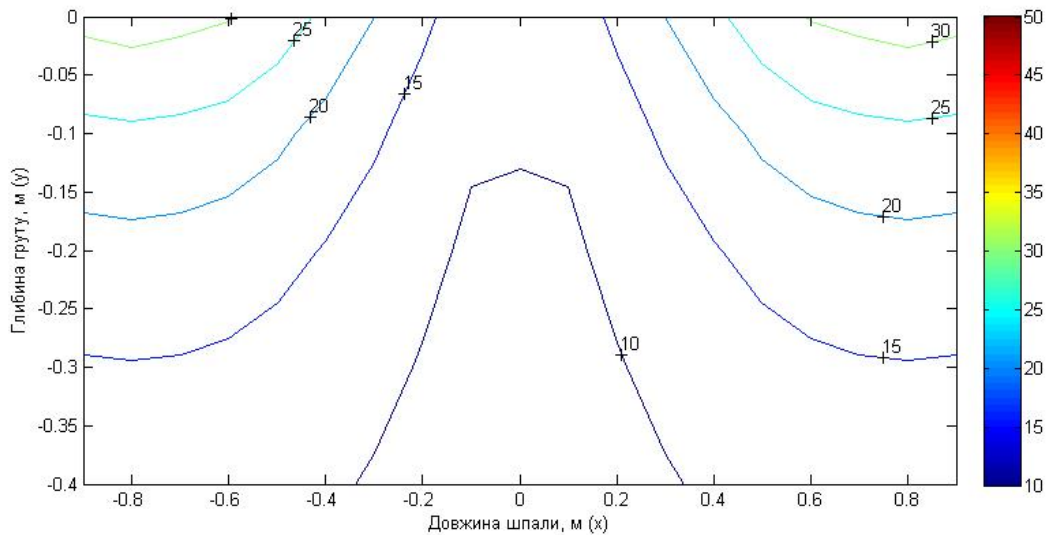


Рисунок 5.20 – Розподілення напружень (кПа) в ґрунті під баластом

Можна по-різному підходити щодо оцінки тотожності розглянутих варіантів при порівнянні баластної і безбаластної конструкцій залізничної колії. Насамперед, конструкції з різною жорсткістю підрейкової основи будуть мати дещо різне значення розрахункових сил від однакового рухомого складу. Але для порівняння розподілень напружень в верхніх шарах ґрунту, автор вважає за більш важливе задати однаковими саме значення прикладеного навантаження і модуль деформації ґрунту.

На основі порівняння результатів розрахунків наведених на рис. 5.19 і 5.20 встановлено, що для безбаластної конструкції характерні більші (до 100 %) значення напружень на поверхні ґрунту (на основній площадці земляного полотна). Починаючи з глибини приблизно 20 см, максимальні значення напружень в ґрунті для обох конструкцій колії не мають суттєвої різниці, але для безбаластної колії обрис розподілення навантаження для однієї відмітки глибини є більш рівномірним.

Вибір того чи іншого варіанту конструкції безбаластної колії, як і в загалі вибір між безбаластною конструкцією і залізничною колією на баласті, потребує докладних техніко-економічних розрахунків (див. п.1.3), які в більшій мірі відносяться до сфери економічних наук. Такі задачі не є предметом дослідження даної роботи.

Метою наведеного порівняння було показати на прикладі безбаластних конструкцій залізничної колії можливість і доцільність застосування розробленої автором моделі для отримання адекватного розв'язку задач напружено-деформованого стану.

5.6 Висновки до розділу 5

1. Доведено адекватність розробленої просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії для визначення напружень в підрейковій основі через порівняння з експериментальними даними, отриманими для пасажирського поїзда зі швидкостями руху до 200 км/год включно.

2. При русі поїзда по залізничній колії з достатньо великою швидкістю руху підрейкова основа може не встигати реалізувати деформації по всій протяжності формування прогину рейки. Це приводить до появи ефекту, коли рейка не буде встигати прогнутися повністю. Навіть при ґрунтах з невеликими модулями деформації (7...10 МПа) швидкості руху для появи такого ефекту складають 215...250 км/год відповідно. На рівень цієї швидкості, окрім характеристик ґрунту (хоча вони й залишаються визначальними), впливають також властивості шарів над ґрунтом.

При складанні земляного полотна з ґрунтів, які мають модуль деформації достатній для забезпечення загального модуля пружності підрейкової основи на рівні 40...50 МПа і більше (що закладається в більшості розрахунків колії на міцність) ефект нереалізації прогину рейки може з'явитися при доволі великих рівнях швидкості руху – 350...400 км/год і вище.

3. Встановлено обриси динамічного прогину рейки в залежності від пружних характеристик колії і швидкостей руху та відповідні геометричні розміри мінімального фронту поширення деформацій в підрейковій основі, які повинні відбутися для реалізації повного прогину рейки.

4. Отримані математичні вирази, які дають змогу аналітично визначити з точністю, достатньої для інженерних розрахунків, обрис області простору підрейкової основи, що приймає участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку. Вони можуть бути використані для вирішення задач встановлення підсилюючих шарів, захисних споруд, обґрунтування розмірів розрахункового простору при моделювання залізничної колії методами скінченних елементів та ін.

5. Визначені коефіцієнти жорсткості і дисипації залізничної колії для введення її в моделі, побудовані на основі систем рівнянь, складених за принципом Лагранжа-д'Аламбера. Доведено, що застосування в таких моделях приведеної маси об'єктів колії доцільне лише для випадків, в яких не встигає відбутися повний прогин рейки.

6. Доведена можливість застосування розробленої автором моделі для отримання адекватного розв'язку задач напружено-деформованого стану для різних, в тому числі для безбаластних конструкцій залізничної колії.

РОЗДІЛ 6

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

6.1 Моделювання процесу розвитку локальної вертикальної нерівності колії

Протягом всього часу експлуатації стан залізничної колії повинен відповідати заданим умовам, особливо можливості реалізації встановлених швидкостей руху. Стан колії прийнято оцінювати показниками її геометричного положення.

Під час експлуатації колії, навіть якщо вона відбувається в повній відповідності до встановлених норм, поступово з'являються та розвиваються різні геометричні нерівності. Можна вважати, що їх усунення та попередження і є основною задачею проведення проміжних ремонтів колії та поточного утримання [160].

Наявність суттєвих нерівностей погіршує динаміку взаємодії колії і рухомого складу, створює можливість порушення умов комфортабельності їзди або навіть безпеки руху. При досягненні певних розмірів нерівності стають причиною обмеження швидкостей руху [159]. Особливої актуальності це питання набирає в умовах сучасних тенденцій збільшення швидкості руху [49, 180], враховуючи, що норми до утримання колії в такому випадку стають більш вимогливими.

Багато сучасних наукових робіт присвячено проблемам, які пов'язані з дослідженням нерівностей колії. Це і питання їх впливу на динамічні показники руху поїздів [35, 109, 165, 181], і засоби та методи їх вимірювання та оцінки [182, 185], і проектування заходів щодо укріплення шарів підрейкової основи для запобігання появи нерівностей [168, 183, 184] тощо.

Постає питання дослідження факторів, що приводять до можливості утворення нерівностей колії та процесу їх розвитку. Враховуючи те, що роботу залізничної колії під поїздами природно представити як систему

пружних тіл, появу і розвиток нерівностей можна описати як процес переходу від пружних до залишкових деформацій. Причому, що підкреслюється в багатьох наукових дослідженнях, приводом для цього, як правило, є ділянки локальної нерівнопружності.

Нерівнопружність підрейкової основи може виникати у різних випадках. Це може бути наслідок порушень стану залізничної колії – наявність просадок, непридатних скріплень, забруднення баласту тощо [161, 109]. Найбільш чутними до розвинення місць нерівнопружності є ділянки з інтенсивним рухом або з обпиранням на слабкі ґрунти. Також нерівнопружність колії може бути обумовлена конструкційними особливостями, такими як примикання до безбаластних мостів [162], наявність переїздів [123, 163] тощо.

В роботах [164, 165] були проведені дослідження процесу накопичення вертикальної деформації колії в дослідному перерізу від багатоциклічного прикладання сили з використанням FEM. Суть моделювання процесу, описаного в цих роботах, полягала в наступному. В першому розрахунку було отримано зміщення шпали в вертикальній площині під дією прикладеного навантаження. Для кожної наступної ітерації розрахунок повторюється, але для кожної шпали зберігається її зміщення, набуте у попередньому розрахунку, у вигляді повітряного зазору.

Результати розрахунків ітераційного моделювання осадки колії показано на рис. 6.1. Таким чином в роботі [165] було зроблено висновок, що із збільшенням кількості ітерацій (пропуску тоннажу) відбувається розвиток осадки колії, але швидкість цього процесу з часом зменшується.

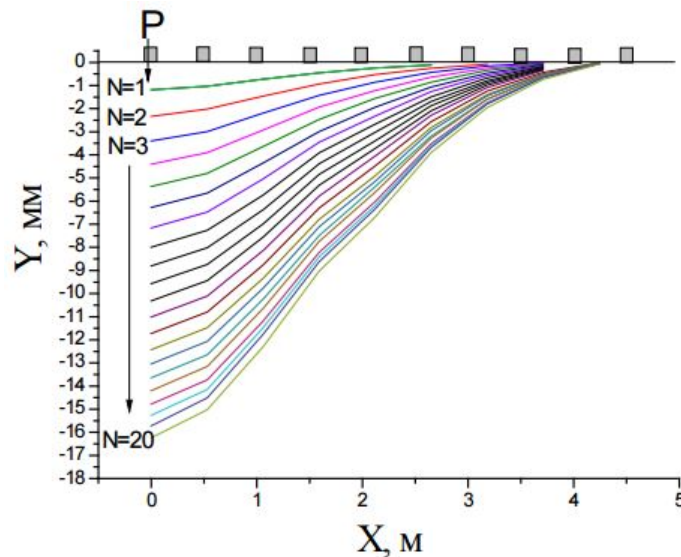


Рисунок 6.1 – Результати розрахунків ітераційного FEM моделювання осадки колії [165]: P – зовнішнє навантаження; Y – осадка; X – відстань від точки дії сили; N – номер ітерації

Збільшення нерівності впливатиме на динаміку взаємодії колії і рухомого складу. Причому цей вплив буде відчутний не тільки під час розташування колеса безпосередньо в зоні нерівності, а й на певній відстані за її межами (за рахунок поступової стабілізації коливань та перерозподілу сил між колесами візка). Тому для дослідження розвитку нерівності (особливо змін її характеристик по довжині колії) необхідно моделювати саме процес руху колеса по ділянці.

Враховуючи те, що для даної задачі всі фактори, крім вертикальної динаміки, будуть зайвими, прийнята спрощена модель, яка складається з колісної пари, що рухається по безінерційній балці (рейка), яка опирається на окремі опори (шпали). Було враховано навантаження, що передається від колісної пари, жорсткі та дисипативні зв'язки між тілами моделі, можливість завдання різної жорсткості для кожної опори та геометричного обрису рейки в вертикальній площині, рис. 5.11б.

Математичний опис коливань колісної пари складається з системи диференціальних рівнянь Лагранжа II-го роду і не має принципових від'ємностей від аналогічних робіт [20, 166].

Відокремлення залишкових деформацій від загальних є складною науковою задачею, особливо для таких багат шарових систем як залізнична колія.

Встановлення прямої лінійної залежності значення залишкових деформацій від загальних порушує адекватність моделі особливо в умовах навантажень, які значно менші за рівні міцності (що більш характерно для пасажирського руху). В такому випадку, причиною виникнення залишкових деформацій будуть виступати не самі прогини колії, а їх нерівномірність по довжині. Тому була прийнята гіпотеза, що збільшення залишкових деформацій для наступного кроку ітерації ($\Delta z_{\text{зал}}(x)$), визначених за пропущеним тоннажем (T), розподіляється по довжині ділянки (x) пропорційно похідній динамічного прогину $z_{\text{дин}}(x)$

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{\text{зал}}(x) &\sim \frac{dz_{\text{дин}}(x)}{dx}, \\ \Delta z_{\text{зал}}(x) &\leq f(T), \\ \exists x, \Delta z_{\text{зал}}(x) &= f(T) \end{aligned} \right\}. \quad (6.1)$$

Запропонований автором підхід надає змогу дослідити процес появи нерівності від наявності нерівнопружності колії та її наступного розвитку в процесі експлуатації.

Розглянемо хід розрахунків на прикладі з дійсними чисельними вихідними даними. Приймемо ділянку залізничної колії з місцем локальної нерівнопружності, яка описана лінійної зміною модуля пружності підрейкової основи від 40 до 30 МПа посередині ділянки на довжині 5 м [144]. Це відповідає наступній послідовності в приведенні до опор (шпал):

$$U = \{40, \dots, 40, 37, 33, 30, 33, 37, 40, \dots, 40\}. \quad (6.2)$$

Перший розрахунок виконується для колії без нерівностей. На рис. 6.3 показано результати моделювання у вигляді динамічного прогину по довжині ділянки від проходження рухомого складу. Прогин в зоні із сталим

модулем пружності підрейкової основи відповідає аналітичним розрахункам за відомою формулою [20, 22]

$$z(x) = \frac{Pk}{2U}. \quad (6.3)$$

де P – вертикальна сила, діюча від колеса на рейку;

k – коефіцієнт відносної жорсткості.

Відповідно до алгоритму (6.1) були визначені залишкові деформації і передані до моделі в якості вихідної геометричної нерівності колії для наступної ітерації. Таким чином, моделюється процес поступового розвитку нерівності – рис. 6.4. Для візуального відокремлення результатів послідовність ітерацій на рис. 6.4 показана з попусценням проміжних кроків.

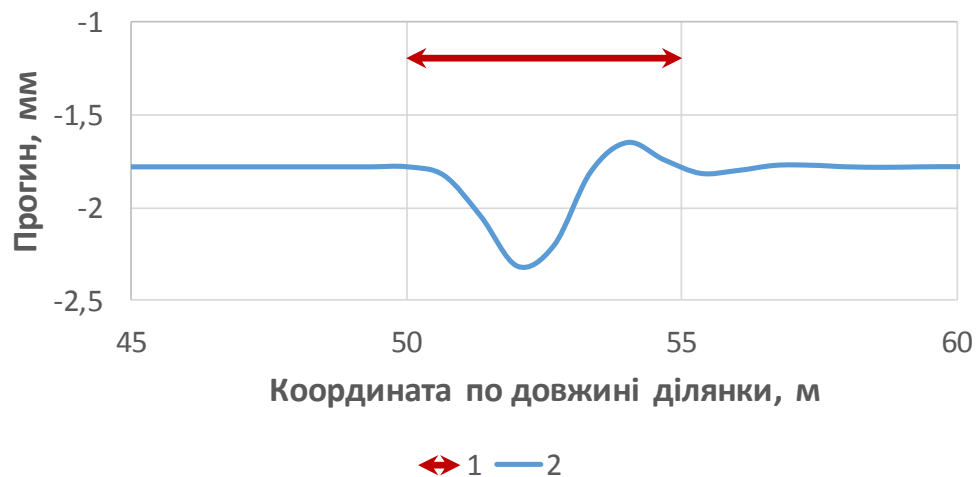


Рисунок 6.3 – Динамічний прогин колії для ділянки без нерівності з локальною нерівнопружністю: 1 – зона нерівнопружності; 2 – прогин колії

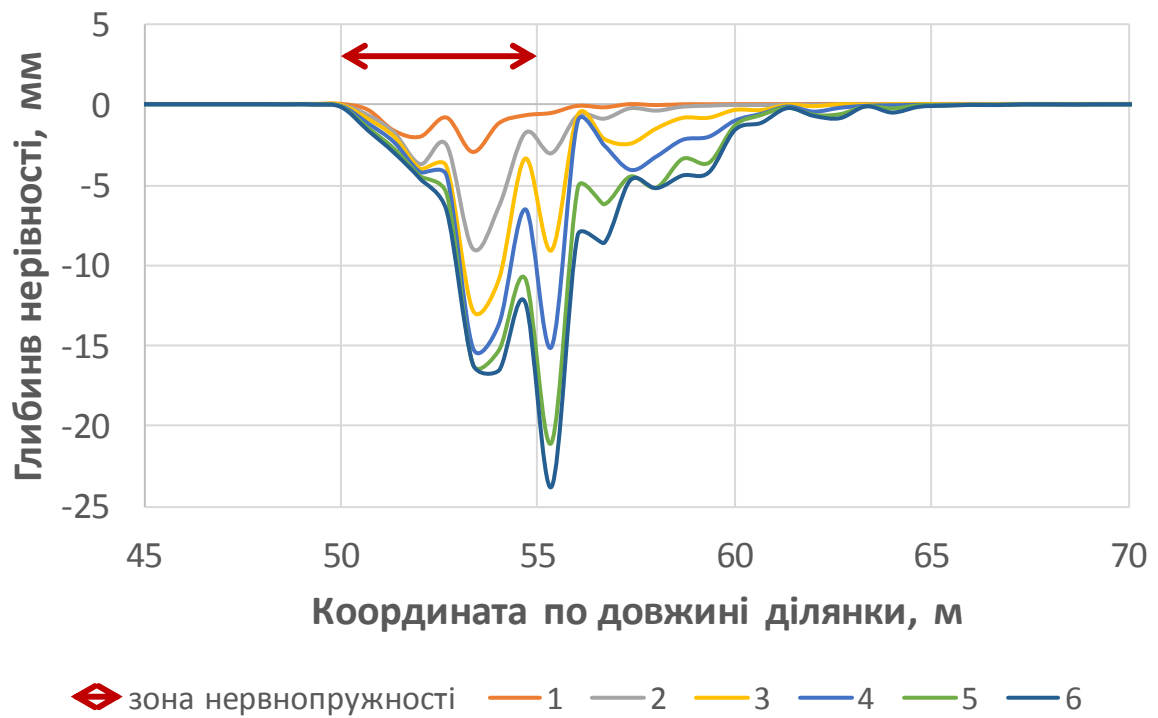


Рисунок 6.4 – Моделювання розвитку нерівності колії в зоні локальної нерівнопружності: 1...6 – послідовність ітерацій розрахунку

Аналогічно до розглянутого чисельного прикладу було здійснено варіантні розрахунки для різних вихідних даних. Дослідження результатів дозволяють встановити певні тенденції. Обрис нерівності, яка утворена залишковими деформаціями, не повторює ні обрис динамічного прогину рейки, ні обрис первинної нерівнопружності. Залишкові деформації набувають максимуму при вході й виході з динамічної нерівності (спочатку це зона нерівнопружності, проходження по якій порушує траєкторію руху колеса, а згодом – поєднання її із геометричною (статичною) нерівністю). З часом експлуатації ділянки вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та утворенням нових. Розвиток нерівності із поступовим зміщенням піків приводить до того, що вона сама по собі стає більш суттєвим фактором додаткової силової взаємодії у порівнянні з первинним – локальною нерівнопружністю, що спричиняє подальше розширення і зміщення нерівності. Наслідком цього є те, що

геометрична нерівність не завжди чітко співпадає з місцем розташування причини її утворення.

В розглянутому прикладі (рис. 6.4) причиною утворення нерівності була зона нерівнопружності. Але після того, як нерівність набуває певних розмірів, вже саме вона визначає динаміку взаємодії колії і рухомого складу і, як наслідок, подальший розвиток процесу. Для демонстрації цього спостереження ітерації в попередньому прикладі було зупинено, при утворенні просадки II ступеня [159] – лінія «3» на рис. 6.4. Для подальших розрахунків був заданий постійний модуль пружності підрейкової основи по всій довжині ділянки. Обрис нерівності, яка була отримана в результаті, показано на рис. 6.5. Для порівняння на цей рисунок також було накладено нерівність з попереднього прикладу (лінія «6» рис. 6.4). З рис. 6.5 видно, що зона локальної нерівності вже не мала суттєвого впливу на процес розвитку деформацій.

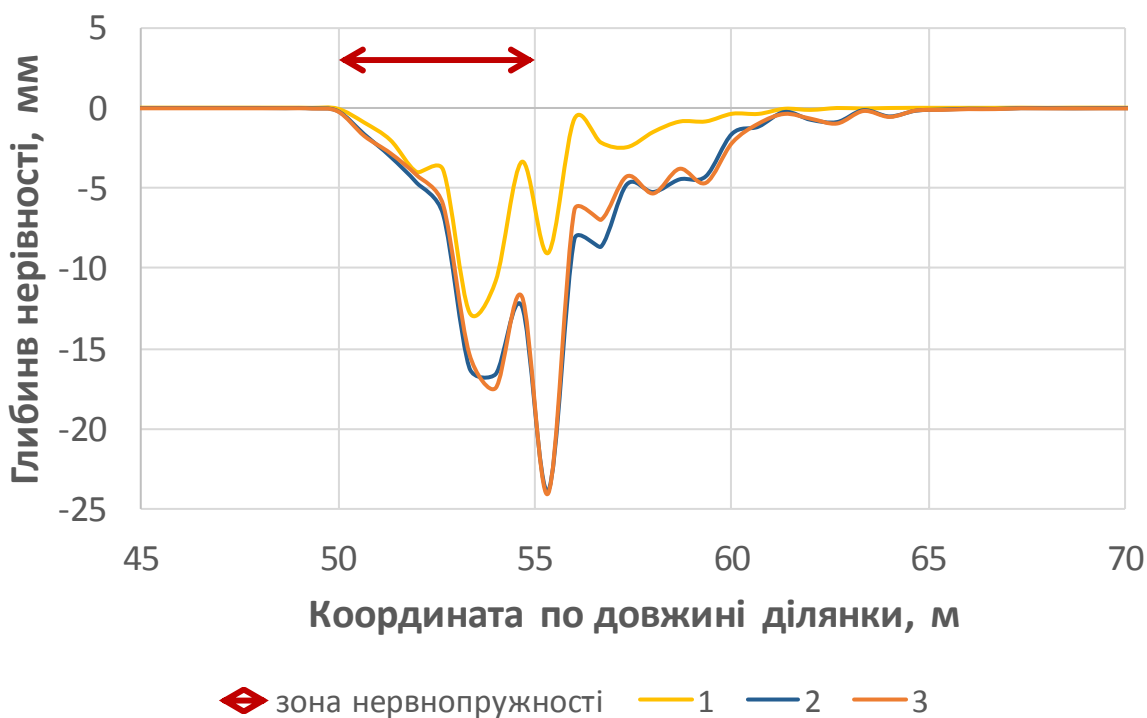


Рисунок 6.5 – Моделювання розвитку нерівності колії для різних варіантів стану ділянки: 1 – вихідна нерівність; 2 – нерівність, утворена з врахуванням впливу первинної зони нерівнопружності; 3 – нерівність, утворена з вихідної з умов поновлення рівнопружності ділянки

В певних випадках створення зони нерівнопружності колії може бути спровоковане не відхиленнями в утриманні, а визначатися конструктивними особливостями, наприклад, ділянка переходу від баластної колії до мосту [162] або зона переїзду [123, 144]. У відповідності до запропонованої методики був промодельований процес розвитку вертикальних нерівностей в зоні переїзду. Зона переїзду у вихідних даних задавалася як ділянка колії з різким збільшення модуля пружності підрейкової основи [123]:

$$U = \{40, \dots, 40, 120, \dots, 120, 40, \dots, 40\}. \quad (6.4)$$



Рисунок 6.6 – Моделювання розвитку нерівності колії в зоні переїзду:

1...6 – послідовність ітерацій розрахунку

Як впливає з наведеного прикладу, наявність переїзду, створивши зону із збільшеним модулем пружності підрейкової основи, проковує появу нерівності колії. Максимальні амплітуди такої нерівності будуть розташовуватися на початку і в кінці утворення. З часом експлуатації ділянки нерівність буде розвиватися, в тому числі по довжині колії, що приведе до

виникнення «ями» за межами розташування конструкції. Такі висновки корелюються і з результатами статистичної обробки обмірів натурних нерівностей перед мостами з безбаластною конструкцією та в зоні розташування переїдів, які наведені в роботах [162, 123, 144] та інших.

6.2 Теоретичні основи моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи

Для моделювання процесу поступової зміни стану залізниці за час експлуатації залізничну колію можна представити як систему, яка складається з множини часток різних речовин, зібраних в цільну конструкцію. Кожна частка оточена зв'язками з іншими, які формують навколо неї щось на зразок пружної оболонки або сукупності зв'язків. При навантаженні системи ця сукупність деформується, а за певних обставин деякі зв'язки руйнуються, що зумовлює перехід від пружних деформацій до залишкових.

Життєвий цикл такої системи можна розглядати як процес накопичення розірваних зв'язків. Якщо кількість розривів доходить до кількості елементарних часток, то відбувається повний розпад системи. Зазвичай приймається, що тіло, яке опрацьовує навантаження, в процесі експлуатації проходить три етапи розвитку, які характеризуються різними швидкостями накопичення деформацій: на першому етапі швидкість накопичення деформацій зменшується, на другому – залишається приблизно постійною, на третьому – збільшується. Наочно це можна продемонструвати графіком на рис. 6.7. Його прототип було наведено у роботі [171] як приклад деформації ґрунту під навантаженням, але якісно він підходить для більшості тіл та їх систем.

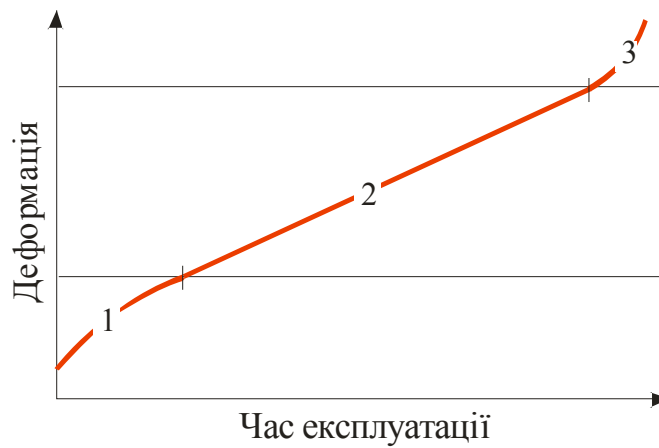


Рисунок 6.7 – Залежність деформації тіла від часу експлуатації: 1 – швидкість деформації зменшується; 2 – швидкість деформації приблизно постійна; 3 – швидкість деформації збільшується

Наприклад, в роботі [165] наведено результати розрахунків для залишкових деформацій залізничної колії в вертикальній площині, які якісно відповідають зонам «1» і «2» графіка, зображеного на рис. 6.7. Також відповідні за характером залежності були отримані в роботах [167, 168], присвячених застосуванню в колії геоматеріалів, які включали розгорнуті дослідження щодо накопичення деформацій підрейкової основи від циклічного навантаження, отримані як експериментально, так і з проведенням математичного моделювання. Деякі аспекти моделювання процесу накопичення залишкових деформацій в залізничній колії були розглянуті в роботах [123, 146].

Перехід у зону «3» (див. рис. 6.7), а можливо тільки наближення до завершення зони «2», враховуючи специфіку саме системи «залізнична колія», не є доцільним. Термін експлуатації залізничної колії не може визначатися до її повного руйнування – весь час повинна забезпечуватися умова безпечного пропуску поїздів з встановленими швидкостями руху. З іншого боку, відмова якогось з елементів або порушення геометричного положення колії в певних межах [159] не обов'язково є приводом для виконання позапланових ремонтних робіт або обмеження швидкості руху. Враховуючи велику протяжність залізничних ділянок, для теоретичних

розрахунків з прогнозування доцільно говорити навіть не про виникнення деформацій якоїсь визначеної величини в певному перерізі колії, а про ймовірність такої події на ділянці. Рішення стосовно доцільності усунення окремих порушень (поточне утримання колії), або виконання проміжних ремонтів, або повної заміни верхньої будови колії повинно прийматися саме із врахуванням швидкості накопичення (розвитку) відхилень. Таким чином, визначення граничного стану залізничної колії є не тільки технічною, а й економічною задачею.

Якщо оперувати вірогідністю появи певних відхилень, зручно стан системи (ступень її старіння) характеризувати кількістю умовних розривів внутрішніх зв'язків для питомої протяжності. Однаковому стану системи можуть відповідати різні комбінації розривів. Зрозуміло, що чим більше кількість розривів, тим більше існує варіантів змін структури системи, що відповідають її однаковому стану. Опису наведеної характеристики відповідає такий числовий показник як ентропія.

Такий підхід можна порівняти з бальною оцінкою стану ділянки за показниками колієвимірювальної стрічки [159], особливо в разі застосування сучасних методів, які враховують показники теорії ймовірності [182, 230]. Однак, колієвимірювальна стрічка дає оцінку фактичному стану залізничної колії, а запропонована методика – можливість моделювати процес зміни стану для прогнозування прямих й непрямих наслідків дії різних факторів. Тому встановлення безпосередньої тотожності між цими підходами не є доречним.

В загальному вигляді ентропія системи визначається за формулою

$$S = k \ln W, \quad (6.5)$$

де k – постійна Больцмана;

W – кількість можливих мікроскопічних станів у наявному макроскопічному стані.

Спочатку ентропія застосовувалась в термодинаміці, але виявилось, що запропоновані наукові підходи є доволі універсальними. На сьогодні,

поняття ентропії використовується в хімії, біології, інформатиці і в багатьох напрямках фізики. Як правило, ентропія адекватно описує розвиток (старіння) більшості систем, для яких цей процес можна представити як поступовий перехід від упорядкованого стану до хаотичного. Як приклади застосування ентропії для опису термінів експлуатації тіл та їх систем можна вказати наступні роботи: [169-177, 229].

Так, в роботі [176] наведено модель накопичення пошкоджень у плямі з'єднання твердих пластичних тіл при відсутності детальної мікроструктурної інформації на основі принципу максимуму ентропії. В роботі [175] описується практичний метод для визначення топологічних фаз стану матеріалу в довільних моделях за рахунок точного розрахунку ентропії за допомогою матриці щільності. В роботі [177] обґрунтовано підпорядкованість розвитку системи ентропії, як аналогу законів термодинаміки, які є універсальними і поширюються на інші напрямки фізики. Коновалов А. А. в роботі [171] показав можливість застосування принципів ентропії у різних галузях, в тому числі демонструє зв'язок ентропії з механічними деформаціями матеріалів, висловлює міркування щодо залежності граничних значень ентропії відносно співвідношення швидкостей поширення в речовині поздовжніх та поперечних хвиль. Гіляров В. Л. в роботі [170] розкриває кінетичну концепцію міцності матеріалів як хід еволюції, що зумовлена ентропією. В роботі [173] наведено математичну побудову методики розрахунку довговічності роботи речовин на основі ентропійного критерію з числовими прикладами. В роботі [174] розглянуто довговічність твердих тіл під навантаженням, обґрунтовано визначення термінів їх руйнування, виходячи з показників ентропії, в тому числі для пояснення положень кінетичної теорії міцності. Куриленко Г. А. в роботі [172] посилається на поняття ентропії для розробки методу прогнозування циклічної довговічності деталей з наявністю тріщин. Деякі положення, наведені в зазначених публікаціях, було використано для проведення досліджень в рамках цієї роботи.

Під час старіння системи її ентропія постійно збільшується. В первинній постановці задачі зміна ентропії визначається як відношення кількості теплоти (δQ), отриманої або втраченої системою, до величини абсолютної температури (T):

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T}, \quad (6.6)$$

Показник теплоти, яка оброблена системою, не обов'язково є наслідком безпосередньо її нагріву (охолодження). Всі механічні процеси, у тому числі деформації, супроводжуються виділенням тепла, перш за все як результат роботи сил тертя, включаючи й внутрішнє тертя. Окрім миттєвого руйнування твердих тіл, що є наслідком виникнення напружень за межами міцності, поступове руйнування (накопичення деформацій) відбувається при загальних навантаженнях значно менших за межі міцності. За рахунок гетерогенності будови реальних тіл і інших факторів (для залізничної колії до таких факторів перш за все треба віднести наявність відступів в утриманні, навіть в межах допусків) зовнішнє навантаження розподіляється нерівномірно, що приводить до виникнення локальних перенапружень. Саме в таких місцях будуть відбуватися процеси розриву напружених зв'язків температурними флуктаціями, що приведе до формування зон розвитку деформацій [174].

Безпосередні дослідження руйнування твердих тіл на рівні структури речовини та перетворень пружних і пластичних деформацій до теплової і інших видів енергії не передбачені в межах цієї роботи. Для вирішення поставленої задачі достатньо визначитись щодо зміни внутрішньої енергії системи за загально відомим рівнянням:

$$dU = \delta Q - \delta A + \mu dN, \quad (6.7)$$

де δA – робота системи проти дії зовнішніх сил;

μdN – зовнішнє додавання речовини у кількості N з потенціалом μ .

Якщо говорити про систему «залізнична колія», то природно розглядати проходження по перерізу колії однієї колісної пари як один такт

зміни енергії. Тоді весь життєвий цикл буде складатися з кількості таких тактів.

Слід звернути увагу, що у формулі (6.7) dU – це зміна енергії (повний диференціал), а δQ і δA – це елементарні (найменші) порції відповідних величин. Тому не зовсім вірно значення останніх ототожнювати з одним тактом. Доцільно представити рівняння (6.7) у диференційному вигляді

$$\dot{U} = \dot{Q} - \dot{A}, \quad (6.8)$$

де точка позначає першу похідну по часу;

прийнято, що $\mu dN = const$.

Тоді, враховуючи формули (6.6) і (6.8), збільшення ентропії системи за час проходження однієї колісної пари можна визначити за формулою

$$\Delta S = \frac{1}{T} \int_0^t (\dot{U} + \dot{A}) dt. \quad (6.9)$$

Це дає змогу показати кількісний показник розриву зв'язків у системі (її старіння) як наслідок виконання механічної роботи

$$W = e^{\frac{S_0}{k} + \frac{n}{kT} \int_0^t (\dot{U} + \dot{A}) dt}, \quad (6.10)$$

де S_0 – початкова ентропія системи (наявна до початку експлуатації);

n – кількість пропущених колісних пар (тактів).

Методика розрахунку інтегралу у формулі (6.10) перш за все, залежить від інструментів щодо визначення роботи системи. В загальному вигляді робота є скалярним добутком сили на вектор переміщення тіла або системи від дії цієї сили

$$A = \int \vec{F} d\vec{s}. \quad (6.11)$$

У системі залізничної колії сила, що діє від колеса на рейку, призводить до вигину рейки і стисканню шарів підрейкової основи, які мають різні фізичні властивості. Поява напружень і деформацій відбувається не тільки по осі прикладання сили, а має трьохвимірний характер із складними законами розподілу в просторі і залежить від багатьох факторів. Навіть для дослідження певного перерізу колії слід враховувати, що прогин в

ньому починається ще під час знаходження колеса на деякій відстані. Як правило (за виключенням високих швидкостей руху), колесо завжди знаходиться у зоні вже майже реалізованих деформацій [124].

6.3 Методика моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи

Виконання числових розрахунків безпосередньо за формулою (6.10) майже унеможлиблюється збігом великого значення кількості колісних пар – у еквівалентні 800 млн т пропущеного тоннажу n залежно від навантаження на вісь дорівнює декільком мільйонам, та маленького значення постійної Больцмана – $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, що відповідає розриву зв'язку на елементарному рівні. Така деталізація зайва.

Як вже було показано вище, система «залізнична колія» не може експлуатуватися до її повного руйнування, а весь час повинна забезпечуватися умова безпечного пропуску поїздів з встановленими швидкостями руху. Тому визначення строків експлуатації і, відповідно, прогнозування термінів проведення ремонтів, – не тільки технічна, а й економічна задача. Виконання такого дослідження в повному обсязі техніко-економічної концепції виходить за рамки даної роботи. Поставлена автором задача – отримати метод оцінки впливу на життєвий цикл експлуатації залізничної ділянки наявності швидкісного пасажирського руху – буде вирішена шляхом визначення саме змін життєвого циклу у порівнянні з ділянками, для умов експлуатації яких міжремонтні терміни є затвердженими діючими нормативними документами [160].

Пропонується оцінювати старіння системи у відсотках, прийнявши, що 100 % відповідають такому стану залізничної колії, коли потрібно виконувати заміну верхньої будови колії (реконструкцію, технічне переоснащення або капітальний ремонт [160]).

Тоді, з урахуванням переходу до зручних одиниць виміру, формула (6.10) набуває вигляд

$$\tilde{W} = 100 \left(e^{bn \int_0^t (U_0 + \dot{A}) dt} - 1 \right), \quad (6.12)$$

де n – кількість мільйонів пропущених колісних пар;

b , U_0 – параметри, значення яких було визначено емпірично за статистичним опрацюванням складу поїздопотоків на магістральних напрямках України. Враховуючи те, що потік поїздів на ділянці буде складатися з різних категорій, формула (6.12) набуває вигляду

$$\tilde{W} = 100 \left(e^{0,066 \sum n_k (0,116 + A_k)} - 1 \right), \quad (6.13)$$

де n_k – кількість мільйонів пропущених колісних пар для k -ї категорії поїздів;

A_k – робота, яку виконує залізнична колія при проходженні колісної пари k -ї категорії поїзда.

Кількість мільйонів колісних пар можна визначити за формулою

$$n_k = \frac{365 \cdot 10^{-6} N_k Q_k T_p}{q_k}, \quad (6.14)$$

де N_k , q_k , Q_k – відповідно кількість за добу, навантаження на вісь і маса поїздів k -ї категорії у тоннах;

T_p – час експлуатації ділянки в роках.

Визначення роботи сил, спрямованих на деформацію залізничної колії в цілому, є дуже широкою задачею. Для вирішення питань порівняння між собою варіантів з різними конструкціями верхньої будови колії або з різними експлуатаційними параметрами, достатньо дотримуватись одноманітності підходу та мати залежність результату саме від того параметра, який відрізняє варіанти.

Тому надалі буде використовуватися термін *еквівалентної роботи залізничної колії, під якою мається на увазі робота сил, що діють від рейки*

на опору і виконує вертикальну деформацію підрейкової основи в перерізі колісної пари.

Для переходу від теоретичних передумов до практичної методики розрахунків будемо намагатися замінювати показники, що для даного варіанту не порівнюються, числовими значеннями, приймаючи їх у відповідності до типових умов експлуатації. Розглянемо декілька варіантів.

Перший варіант. Роботу від проходження колісної пари можна розрахувати як добуток сили, що діє від рейки на підрейкову основу (Q), на прогин від діє цієї сили (z)

$$A = 2Qz. \quad (6.15)$$

Прогин рейки як балки, що лежить на рівнопружній основі, визначається за формулою

$$z = \frac{Pk}{2U}, \quad (6.16)$$

де P – сила, що діє на рейку з урахуванням динамічних добавок;

U – модуль пружності підрейкової основи;

k – коефіцієнт відносної жорсткості.

Сила, що діє від рейки на опору:

$$Q = \frac{kl}{2}P, \quad (6.17)$$

де l – відстань між осями підрейкових опор (шпал);

У першому наближенні сила дії від колеса на рейку може бути виражена через вагу колісної пари. Тоді для практичного розрахунку роботи, прийнявши типові значення зазначених параметрів, будемо мати

$$A = 3,6 \cdot 10^{-4} q^2, \quad (6.18)$$

де q – навантаження на вісь, т. Значення коефіцієнту отримано через поєднання формул (6.15...6.17) для рейок Р65, з/б шпал з епюрою 1840 шт/км, модуль пружності підрейкової основи 50 МПа; крім іншого, коефіцієнт враховує, що результат роботи буде отримано в кН·м.

Навіть такий спрощений підхід вже дає змогу порівняти дію на колію різних потоків поїздів.

Другий варіант. Як розрахункову залишаємо формулу (6.15). Сила і прогин, які входять до неї, більш точно можуть бути визначені за розрахунками колії на міцність [20, 22]. Це дає змогу врахувати швидкості руху поїздів і деякі характеристики конструкції та стану ділянки колії.

Схожий підхід було використано автором в роботі [134] для вирішення задачі визначення впливу стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії.

Третій варіант. Робота сил системи може бути визначена як сума робіт її складових частин

$$A = \sum A_i . \quad (6.19)$$

Розрахунки залізничної колії на міцність [20, 22] дають змогу визначати навантаження на окремі шари залізничної колії. Тоді для обчислення роботи треба визначати об'ємні розширення шарів від тиску на них. Це потребує виконання досить складних розрахунків з залученням низки додаткових вихідних даних щодо фізичних і геометричних характеристик. Такий підхід виходить за рамки інженерного розрахунку колії на міцність. Тому пропонується обмежитись визначенням вертикальної деформації шару будови колії, наприклад, за формулою Шлейхера-Бусінеска

$$z = \frac{w\sigma\sqrt{\Omega}(1-\mu^2)}{E}, \quad (6.20)$$

де σ – напруження на поверхні шару площиною Ω ;

E – модуль пружності шару;

μ – коефіцієнт Пуассона;

w – поправочний коефіцієнт.

Спираючись на формулу (6.20) під час виконання практичних розрахунків для більшості випадків, отримано наступну залежність роботи від напружень

$$A = (0,67\sigma_{\text{ш}} + 4,96\sigma_{\text{б}} + 45,7\sigma_{\text{зн}})Q \cdot 10^{-3}, \quad (6.21)$$

де $\sigma_{\text{ш}}$, $\sigma_{\text{б}}$, $\sigma_{\text{зн}}$ – напруження відповідно на поверхні шпали під підкладкою, на поверхні баласту під шпалою, на основній площадці земляного полотна в МПа за умови отримання роботи у кН·м.

Такий підхід, у порівнянні з попередніми, додає можливість враховувати конструкцію колії. Це дає змогу вирішувати не тільки задачі порівняння різних потоків поїздів, а й враховувати варіанти конструкції залізничної колії.

Четвертий варіант. Усі розглянуті методики визначення роботи сил системи базуються на статичній залежності деформації від сили. В основу розрахунків залізничної колії на міцність [20] також покладене припущення о миттєвості виникнення в залізничній колії напружень і деформацій, що урівноважують дію прикладеної сили. Для таких випадків інтеграл у формулі (6.10) вироджується. Для звичайних швидкостей руху такого підходу достатньо. Виключення складає рух поїздів з високими швидкостями, при яких виникає необхідність враховувати динаміку прогину підрейкової основи [124]. Тоді робота може бути визначена через тензор напружень і деформацій

$$\dot{A} = \sum \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}. \quad (6.22)$$

Для таких розрахунків потрібно залучення відповідних фізико-математичних моделей залізничної колії.

Для можливості практичного застосування запропоновані вище формули з прийнятими числовими коефіцієнтами зведено до табл. 6.1.

Результатом наведених розрахунків буде вичерпання ресурсу залізничної колії на розрахунковий час, виражене у відсотках. При переході до формули (6.13) з визначеними числовими параметрами за 100 % прийнято строк, який відповідає пропуску 800 млн т брутто на ділянці, яка за вантажонапруженістю відноситься до І-ї категорії [160]. Прийнято, що весь час експлуатації стан колії відповідає встановленим нормам [159], у тому числі не потребує обмежень швидкості руху, що досягається своєчасним

виконанням робіт з поточного утримання та проміжних ремонтів. Тому порівнюючи варіанти, які в однаковий строк експлуатації встановлений за пропущеним тоннажем мають за наведеною методикою різну оцінку, перш за все, можна робити висновок щодо різниці у витратах, які вони будуть потребувати на поточне утримання. Деякі приклади виконання подібних розрахунків наведені в роботі автора [126].

Таблиця 6.1 – Розрахункові формули оцінки строків накопичення деформацій залізничної колії

варіант	Розрахункові формули		Фактори, що враховано
	вичерпання ресурсу залізничної колії $\tilde{W}$, %	робота колії від проходження колісної пари A , кН·м	
1	$\tilde{W} = 100 \left(e^{0,066 \sum n_k (0,116 + A_k)} - 1 \right)$ $n_k = \frac{365 \cdot 10^{-6} N_k Q_k T_p}{q_k}$	$A = 3,6 \cdot 10^{-4} q^2$	осьове навантаження
2		$A = 2Qz$	структура (маса, кількість та швидкість) потоку поїздів
3		$A = (0,67\sigma_{ш} + 4,96\sigma_{\delta} + 45,7\sigma_{зп}) \times Q \cdot 10^{-3}$	структура потоку поїздів, конструкційний склад колії
4	$\tilde{W} = 100 \left(e^{0,066 \sum n_k \int_0^t (0,116 + \dot{A}_k) dt} - 1 \right)$	$\dot{A} = \sum \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$	детальне врахування конструкції колії, високі швидкості руху

Для детального врахування впливу на життєвий цикл залізничної колії витрат на роботи в міжремонтний термін запропонована методика може бути розширена відмовленням від припущення, що $\mu dN = const$, яке було прийнято для формули (6.7). Тоді через цей вираз буде враховано відновлення системи через залучення зовнішньої дії (виправлення геометрії) або введення до неї нових частин речовини (часткова заміна елементів верхньої будови колії, що вийшли з ладу).

6.4 Варіантні порівняння за умовами експлуатації

6.4.1 Застосування аналітичної методики

Розроблена автором методика моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи дає змогу порівнювати між собою різні варіанти конструкції та встановлені умови експлуатації залізничної колії. Таке порівняння дає змогу визначити вплив тих чи інших параметрів на міжремонтні терміни. Варіанти порівняння будуть розглянуті на базі прикладів.

Приклад 1. Приймемо наступний потік поїздів за добу: 30 пасажирських масою 1000 т з навантаженням 15 т/вісь, 40 вантажних масою 4000 т з навантаженням 21,5 т/вісь. Така ділянка буде відноситись до I-ї категорії [160] – вантажонапруженість складає приблизно 70 млн т км брутто на км за рік. Результати розрахунків показують вичерпання ресурсів 100,1 %, тобто результат відповідає до положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт [160], строк експлуатації ділянки (між модернізаціями) буде призначено після пропуску 800 млн·т·брутто, що, відповідно до вантажонапруженості, відбудеться через 11,5 років. На рис. 6.8 цей варіант показано лінією № 1.

Таблиця 6.2 – Розрахунки вичерпання ресурсу залізничної колії за першим варіантом

Кількість поїздів за добу (N)	Маса поїзда, т (Q)	Навантаження на вісь, т/вісь (q)	Кількість мільйонів колісних пар на рік (n_k) – ф. (6.14)	Еквівалентна механічна робота, кН·м (A) – ф. (6.18)	Вичерпання ресурсу, % (W) – ф. (6.13)
30	1000	15	8.421	0.081	100,1
40	4000	21.5	31.334	0.166	

Приклад 2. Для потоку поїздів, заданого в 1-му прикладі, врахуємо вплив швидкостей руху. Зробимо порівняння двох варіантів. 1-й варіант – швидкості руху 100 і 40 км/год для пасажирських і вантажних поїздів відповідно; 2-й варіант – 160 і 80 км/год. Для цього скористаємося 2-м варіантом методики – формула (6.15) з розрахунком сили и прогину за Правилами розрахунків залізничної колії на міцність [22], табл. 6.3 і 6.4.

Таблиця 6.3 – Розрахунки еквівалентної механічної роботи за другим варіантом

Швидкість руху, км/год	Пасажирський вагон			Вантажний вагон		
	Q , кН	z , м	A , кН·м (ф. (6.15))	Q , кН	z , м	A , кН·м (ф. (6.15))
100	29,9	0.001071	0,0619			
40				43,81	0.0016	0,140
160	32,27	0.001195	0,077			
80				50,29	0.00186	0,187

Таблиця 6.4 – Розрахунки вичерпання ресурсу залізничної колії за другим варіантом

Роки	Кількість мільйонів колісних пар (n_k)		Вичерпання ресурсу, % (W) – ф. (6.13)	
	пас.	вант.	варіант 100/40	варіант 160/80
1	0.730	2.716	5.60	6.57
2	1.460	5.433	11.52	13.57
3	2.190	8.149	17.76	21.04
4	2.920	10.865	24.36	28.99
5	3.650	13.581	31.33	37.46
6	4.380	16.298	38.68	46.50
7	5.110	19.014	46.45	56.12
8	5.840	21.730	54.65	66.38
9	6.570	24.447	63.32	77.31
10	7.300	27.163	72.46	88.96
11	8.030	29.879	82.13	101.38
12	8.760	32.595	88.91	114.61

Приклад 3. Для другого варіанту поїздопоток з попереднього прикладу (160/80), розглянемо вплив недостатньої товщини баластного шару. Зробимо порівняння двох варіантів. 1-й варіант – товщина баласту 40 см, 20-й варіант – 60 см. Для такого порівняння скористаємось третім варіантом методики – формула (6.21). Напруження в елементах колії будуть розраховані за Правилами розрахунків залізничної колії на міцність [22], табл. 6.5 і 6.6.

Таблиця 6.5 – Розрахунки еквівалентної механічної роботи за третім варіантом

Товщина баласту, см	Пасажи́рський вагон				Вантажний вагон			
	Напруження, МПа			A , кН·м (ф. (6.21))	Напруження, МПа			A , кН·м (ф. (6.21))
	$\sigma_{ш}$	σ_6	$\sigma_{зп}$		$\sigma_{ш}$	σ_6	$\sigma_{зп}$	
40	0,659	0,108	0,0358	0,132	1,026	0,169	0,0563	0,206
60			0,0298	0,0755			0,0473	0,185

На момент пропуску 800 млн·т·брутто при швидкісних умовах експлуатації 160/80 км/год для варіанту з товщиною баластного шару 40 см (на 20 см менше нормативної товщини для ділянки І категорії) ресурс буде вичерпано більше ніж на 15,5 %, при товщині баласту 60 см – тільки на 13,1 %. На рис. 6.8 розглянуті варіанти показані лініями з номерами «4» і «5».

Таблиця 6.6 – Розрахунки вичерпання ресурсу залізничної колії за третім варіантом

Роки	Кількість мільйонів колісних пар (n_k)		Вичерпання ресурсу, % (W) – ф. (6.13)	
	пас.	вант.	варіант $h_6=40\text{см}$	варіант $h_6=60\text{см}$
1	0.730	2.716	7.22	6.53
2	1.460	5.433	14.96	13.49
3	2.190	8.149	23.26	20.90
4	2.920	10.865	32.16	28.80
5	3.650	13.581	41.70	37.21
6	4.380	16.298	51.93	46.17
7	5.110	19.014	62.90	55.71
8	5.840	21.730	74.66	65.88
9	6.570	24.447	87.27	76.71
10	7.300	27.163	100.79	88.26
11	8.030	29.879	115.28	100.55
12	8.760	32.595	130.82	113.65

За аналізом результатів, наведених на рис. 6.8, можна порівняти вплив на процес накопичення деформацій характеристик поїздопотоків (показано на прикладі різних швидкостей руху – варіанти розрахунків «2» і «3») та параметрів конструкції колії (показано на прикладі різної товщини баластного шару – варіанти розрахунків «4» і «5»). Різницю у строках отримано за умови однакового міжремонтного утримання ділянки у всіх розглянутих випадках. Тому для практичного використання доцільно говорити про тотожний висновок – зміну у витратах на міжремонтне

утримання при призначенні ремонту у однаковий термін за пропущеним тоннажем.

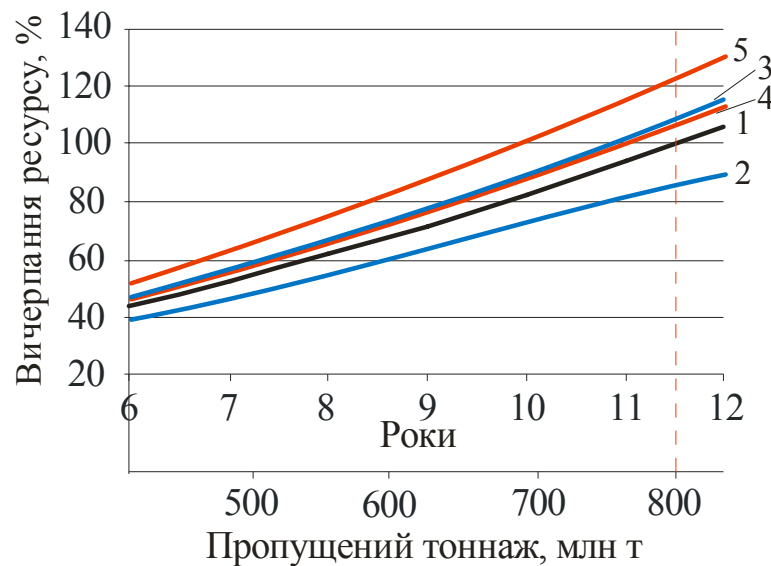


Рисунок 6.8 – Вичерпання ресурсу в залежності від часу експлуатації: 1...5 – номери розрахунків за прикладами, наведеними вище

6.4.2 Застосування розробленої моделі динамічних деформацій залізничної колії

Використання просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії дає змогу розраховувати механічну роботу через тензори напружень і деформацій за четвертим варіантом відповідно до табл. 6.1 – формула (6.22). Але в цьому випадку потрібно теж формалізувати поняття механічної роботи. Розглядання деформацій як просторових змін об'ємів напруженої речовини в більшому обсязі відповідає фізиці процесу, але порушує деякі зі зроблених раніше умов і унеможливорює тотожність при використанні результатів попередньо розглянутих елементів методики.

Для збереження введеного визначення роботи залізничної колії, як такої, яку виробляють сили, що діють від рейки на опору і спричиняють вертикальну деформацію підрейкової основи в перерізі колісної пари, зробимо допущення, що швидкість зміни механічної роботи буде пропорційна швидкості зміни вертикальних деформацій:

$$\dot{A} \sim \sum_i \sigma_{y(i)} \dot{\epsilon}_{y(i)} . \quad (6.23)$$

Розглянемо ділянки залізничної колії з наступними характеристиками: рейки Р65, з/б шпали з епюрою 1840 шт/км, баласт щебеневий товщиною 0,5 м з модулем деформації 100 МПа, ґрунт з модулем деформації 25 МПа. Навантаження 117 кН рухається зі швидкістю 160 км/год.

Напруження і деформації визначалися в підрейковій основі для розрахункового перерізу колії на глибині до 1,0 м від підшви шпали для періоду знаходження колеса до і після впливу на переріз. На рис. 6.9 показані нормальні (вертикальні) напруження в підрейковій основі для контрольних відміток: 0,3 м глибині в баласті; 0,5 м – основна площадка земляного полотна; 0,7 м – 20 см глибині в ґрунті.

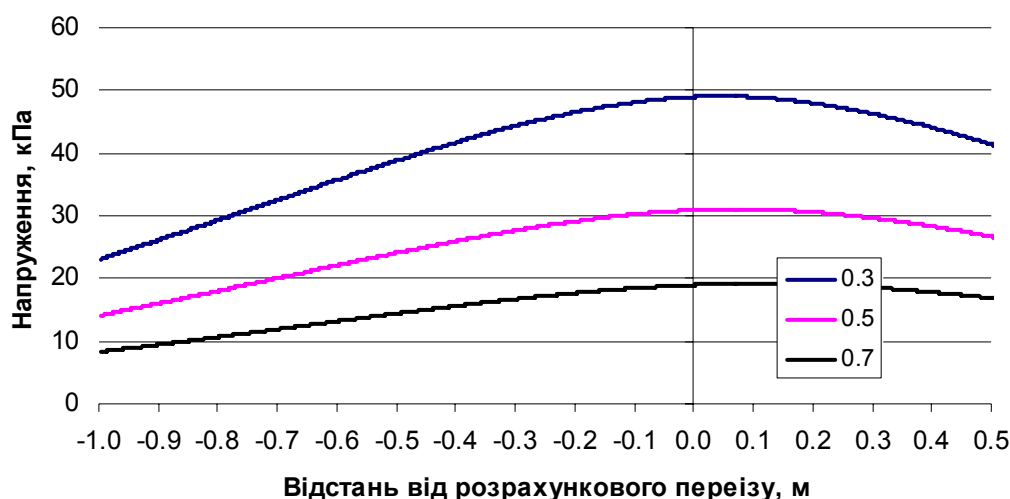


Рисунок 6.9 – Зміна напружень в підрейковій основі на різній глибині в залежності від положення колеса відносно розрахункового перерізу

На рис. 6.9 і на наступних цієї серії рух колеса відбувався зліва направо, тобто при від'ємних координатах колесо, наближається до розрахункового перерізу, при додатних – віддаляється. Як видно з рис. 6.9 максимальні значення напружень майже співпадають з моментом знаходження колеса в точці розрахункового перерізу, невелике запізнення набуття максимальних значень пояснюється проявом дисипації залізничної

колії, що було розглянуто в розділі 5. Таке ж будуть розташовані й максимуми прогинів підрейкової основи (див. рис. 5.8-5.10).

На рис. 6.10 показні аналогічні графіки для похідної еквівалентної роботи, порахованої за формулою (6.23). Показово, що місце максимального значення цього параметра, а як було доведено вище, саме він визначає інтенсивність старіння системи, знаходиться перед колесом. Коли колесо під'їжджає до розрахункового перерізу, деформації вже майже реалізовані і, навіть, вже майже стабільні. Саме на деякій відстані перед колесом відбувається інтенсивний набір деформацій – система виконує основну частину механічної роботи. За колесом звичайно спостерігається скидання напруженого стану, але інтенсивність цього процесу трохи менше за попередній, що пояснюється проявом дисипації.

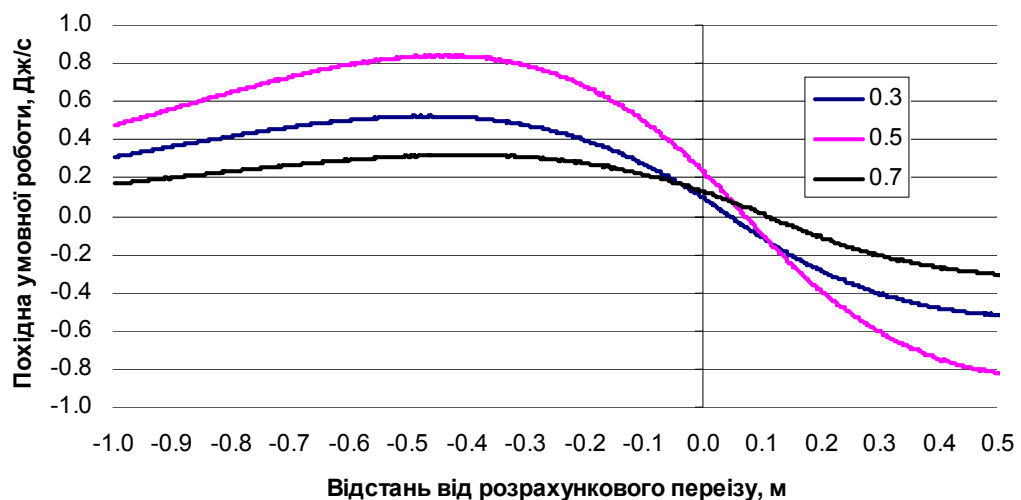


Рисунок 6.10 – Зміна похідної еквівалентної роботи для підрейковій основі на різній глибині в залежності від положення колеса відносно розрахункового перерізу

Для ділянки залізничної колії з розглянутими характеристиками були виконані аналогічні розрахунки для швидкостей руху від 80 до 320 км/год. Значення розрахункової сили приймалося за формулою (2.28б) для статичного навантаження 85 кН (див. рис. 4.17) і склало від 112 до 128 кН.

На рис. 6.11 показані відстані перед колесом, на яких зафіксовані максимальні значення похідної еквівалентної роботи залізничної колії для різної глибини підрейкової основи відносно підшви шали, рис. 6.12. Поєднання точок лініями на рис. 6.12 не зовсім доречно, особливо між відмітками 0,4...0,5 м, але це спрощує візуальне сприйняття. Можна спостерігати зменшення похідної еквівалентної роботи з глибиною, як і очікувалось. Показово, що на межі контакту різних середовищ – шару баласту і земляного полотна – значення показника, що досліджується, знову збільшується, причому майже до рівня 20 см відмітки в баласті, що вказує місця інтенсивної роботи системи, а відповідно й розташування потенціальних зон накопичення залишкових деформацій.

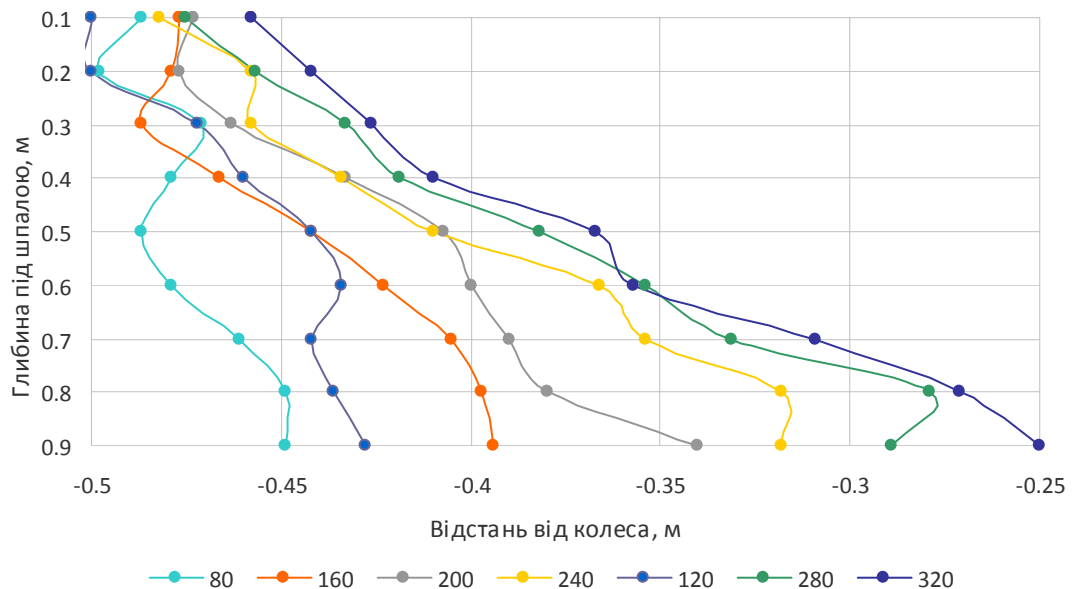


Рисунок 6.11 – Положення колеса при максимальних значеннях похідної еквівалентної роботи залізничної колії

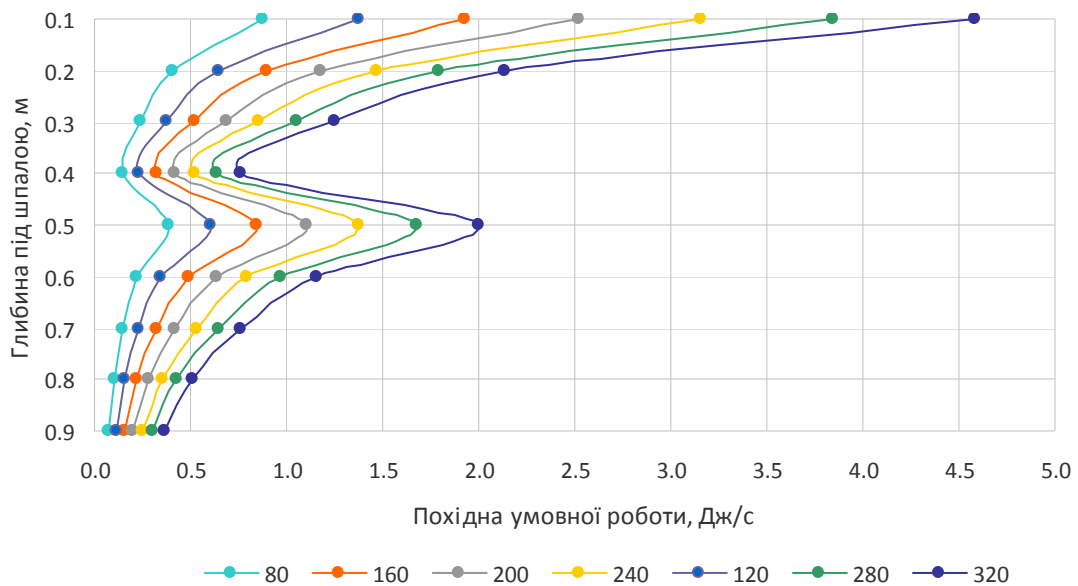


Рисунок 6.12 – Максимальні значення похідної еквівалентної роботи на різних відмітках глибини підрейкової основи відносно підшви шпали

Аналогічно було виконані варіантні розрахунки для різних характеристик ділянки і різних навантажень. Порівняння отриманих результатів дало змогу представити збільшення інтенсивності вичерпання ресурсу системи при зростанні швидкості руху як поправочний коефіцієнт, який умовно збільшує вагу поїзда для можливості використання звичної методики оцінки за пропущеним тоннажем, табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Коефіцієнт умовного збільшення пропущеного тоннажу для врахування швидкості руху

Швидкість руху, км/год	до 120	121-160	161-210	211-250	251-290	291-320
k	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

6.4.3 Економічна ефективність своєчасного проведення реконструкції, технічного переоснащення колії

Ремонтні роботи на ділянках з високою швидкістю руху пасажирських поїздів, пов'язані з заміною матеріалів верхньої колії на нові, що визначає завершення повного життєвого циклу конструкції, відповідно до діючих доповнень до [160] будуть відноситись до реконструкції, технічного переоснащення колії.

Основною причиною призначення такого ремонту є ні втрата конструкцією можливості забезпечувати роботу з встановленими параметрами експлуатації, а зростання вартості поточних робіт щодо підтримання її у відповідному стані – тобто зростання інтенсивності накопичення залишкових деформацій.

Як було показано вище не завжди достатнім критерієм визначення терміну експлуатації ділянки між такими ремонтами є пропущений тонаж. При достатньо великій швидкості руху поїздів залишкові деформації визначаються не тільки рівнем напружень, що виникають в елементах колії, а й швидкістю відповідних до них пружних деформацій – ϕ . (6.22). Для забезпечення можливості використання діючих нормативів [160], динамічні ефекти, що приводять до додаткового накопичення залишкових деформацій, були враховані коефіцієнтами, які приводять їх до еквівалентного пропуску навантаження – табл. 6.7.

Таким чином ділянки, на яких забезпечується пропуск пасажирських поїздів зі швидкостями руху 160 км/год і більше, можуть потребувати проведення ремонту раніше, ніж у термін, встановлений за пропущеним тоннажем. Відсутність своєчасної реконструкції, технічного переоснащення буде приводить до ефекту простроченого ремонту, що потребує додаткових витрат на поточне утримання.

На визначення втрат, пов'язаних з простроченим ремонтом колії, впливає багато різних факторів, пов'язаних не тільки з усуненням відхилень в стані колії, а й зносом рухомого складу, втратами на період обмеження

швидкості руху тощо. Результати таких оцінок можуть суттєво відрізнятися для різних ділянок. Як правило, такі дослідження повинні базуватися на статичній обробці даних за утриманням ділянки на достатньо великому часовому діапазоні. Результати виконання таких робіт наведено в низці наукових праць – [20, 58, 242] та ін. Так на рис. 6.13 показано витрати на матеріали при поточному утриманні залізничної колії на ділянках з понаднормативним значенням пропущеного тоннажу на прикладі Придніпровської залізниці, наведені в роботі [58].

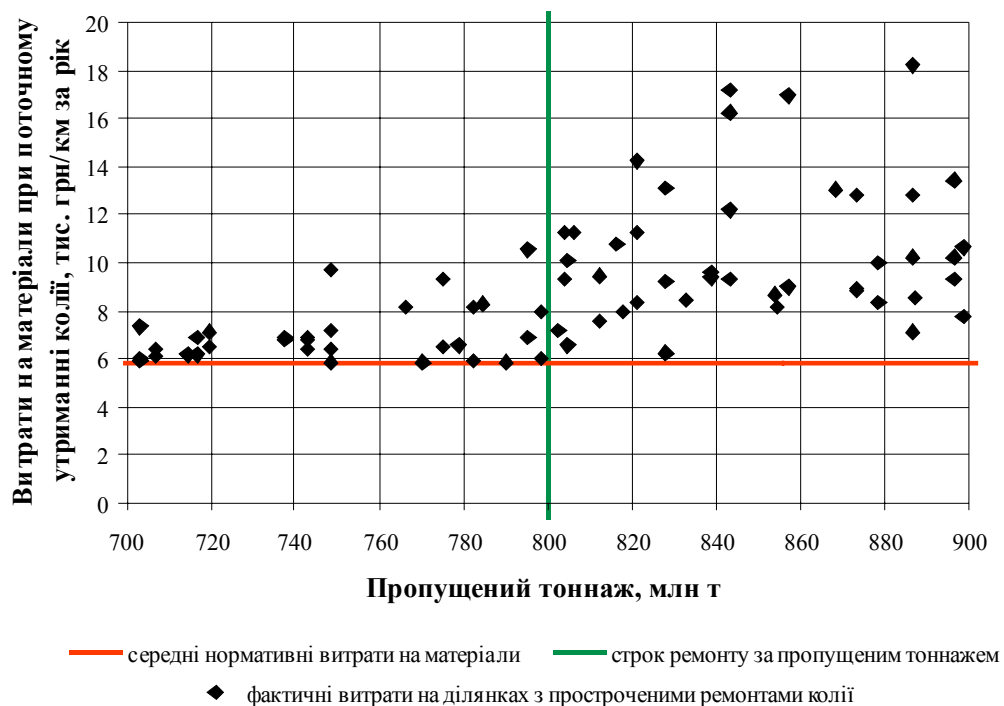


Рисунок 6.13 – Витрати на матеріали при поточному утриманні залізничної колії на ділянках з понаднормативним пропущеним тоннажем [58]

Станом на 2014 р. начальник Головного управління колійного господарства Є. Юрковський наводить дані, що невиконання робіт з реконструкції та капітального ремонту колії спричиняє погіршення технічного стану, виникненню несправностей, які потребують обмеження швидкості руху як пасажирських, так і вантажних поїздів. Це призводить до збільшення експлуатаційних витрат. Приміром, зниження швидкості руху до

60 км/год на 1 км на напрямку Миронівка-П'ятихатки веде до річних непродуктивних втрат на суму 436 тис. грн. [242].

Базуючись на цих та інших роботах можна очікувати, що своєчасне виконання ремонтів дає змогу запобігти непродуктивним експлуатаційним витратам, пов'язаним з погіршенням технічного стану ділянки, які в середньому складають 450 тис. грн/км на рік.

6.5 Висновки до розділу 6

1. Одною з основних причин утворення геометричних нерівностей слід вважати наявність нерівнопружності колії. Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов'язково повторює місце положення проблемної ділянки. З часом експлуатації ділянки вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та появою нових. Інтенсивність зростання амплітуди нерівності в місці її початкового утворення з часом експлуатації зменшується, але процес набуває розвитку в інших місцях, що, як правило, приводить до розвитку так званих ям на підході до нерівнопружної ділянки.

2. Термін служби залізничної колії залежить не тільки безпосередньо від пропущеного вантажу, а й від динамічного характеру навантаження та пружно-жорсткісних показників залізничної колії. Проведено теоретичні дослідження, на основі яких створено аналітичну методику для моделювання процесу накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи. Така методика дає можливість порівнювати варіанти з різними параметрами поїздопотoku, різними встановленими швидкостями руху, характеристиками конструкції колії тощо.

3. Сприйняття навантаження підрейковою основою найбільш інтенсивно збільшує ентропію системи в зоні перед колесом, що наближається, на відстані 25-45 см. Причому менші значення відповідають більшим швидкостям руху та більшій глибині спостереження у підрейковій

основі. З глибиною підрейкової основи інтенсивність зростання ентропії, а відповідно і накопичення залишкових деформацій, зменшується, максимальні значення відповідають зонам контакту шарів різних матеріалів.

4. Обґрунтовані коефіцієнти умовного збільшення пропущеного тоннажу для врахування швидкості руху поїздів. Числові значення коефіцієнтів складають від 1,1 до 1,5 для швидкостей руху пасажирських поїздів 121-320 км/год відповідно. Своєчасне виконання ремонтів дає змогу запобігти непродуктивним експлуатаційним витратам, пов'язаним з погіршенням технічного стану ділянки, які в середньому складають 450 тис. грн/км на рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальну науково-технічну проблему з розробки методології (системи стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії для впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі й високошвидкісного руху поїздів як в Україні, так і у сполученні між Україною і європейськими державами. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають у такому:

1. Забезпечення високих значень швидкості руху поїздів повинно ґрунтуватися на наявності відповідних методико-розрахункових та нормативних документів. Більшість існуючих методик базуються на принципах, які доцільні тільки для прискореного руху – до 160 км/год. На підставі проведеного аналізу конструктивних характеристик колії, показників її технічного стану і експлуатаційних факторів сформульовано проблемні завдання, що виникають через відсутність теоретичної моделі, яка враховувала б динамічні процеси, що відбуваються в колійній інфраструктурі при високих швидкостях, що є визначальним фактором в забезпеченні надійного й безпечного функціонування залізничної колії на напрямках швидкісних залізниць.

2. Збільшення рівня швидкості руху впливає на процеси формування динамічних сил, що діють від колеса на рейку. За комплексним аналізом аналітичних розрахунків і результатів статистичної обробки експериментальних даних встановлено, що за впливовістю різних динамічних факторів можна відокремити такі швидкісні зони: до 100–120 км/год, 120–250 км/год, більше 250 км/год. Основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів, які рухаються зі швидкістю 120 км/год і більше, є коливання системи «колесо–рейка», а саме – проходження колесом динамічної рейкової нерівності.

3. Нерівнопружність залізничної колії є одним з факторів ускладнення розрахунків напружено-деформованого стану. Розроблено принципи врахування як локальних змін модуля пружності підрейкової основи (наявність відхилень в утриманні), так і сполучень ділянок конструктивно різної пружності (мости, переїзди) для розрахунків залізничної колії на міцність. Встановлено, що наявність локального зменшення пружності підрейкової основи (просадки) може збільшувати напруження в рейках до 25 %.

4. Розроблено принципово нову модель взаємодії колії і рухомого складу, яка, на відміну від існуючих, дає змогу визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків як для залізниць із звичайною швидкістю руху поїздів, так і для умов швидкісного й високошвидкісного руху. Адекватність моделі для вирішення поставлених задач підтверджена порівнянням результатів з експериментальними даними та з аналітичними методиками розрахунків при відповідній тотожності розрахункових умов.

5. Динамічні складові напружено-деформованого стану залізничної колії залежать від показників жорсткості шарів підрейкової основи. Чим менший модуль пружності, тим менша швидкість поширення напружень і, як наслідок, при менших швидкостях руху можуть спостерігатися динамічні ефекти, які виходять за межі використання квазістатичних розрахунків. Результати визначення модуля пружності підрейкової основи за розробленою методикою на основі експериментальних вимірювань напружень у рейках підтвердили, що його значення, особливо в літній період, можуть бути меншими за розрахункові, встановлені відповідно до чинних нормативів. Так, на дослідних ділянках, які належать до I категорії колії і не мають відхилень в утриманні більше ніж другого ступеня, було визначено модулі пружності підрейкової основи на рівні 22 і 35 МПа.

6. За результатами експериментальних досліджень для сучасних пасажирських поїздів отримано залежності динамічних значень вертикальної сили від швидкості руху до 200 км/год включно. Для локомотивів спостерігається майже лінійна залежність максимальної вірогідної сили від швидкості руху, що відповідає розрахункам за чинними методиками; для пасажирських вагонів кореляція між значеннями сили і швидкістю руху не виражена. Для низької швидкості (80 км/год) розподіл значень вертикальної сили, виміряних експериментально, майже повністю збігається з теоретичним розподілом за законом Гаусса; для високої швидкості руху (200 км/год) експериментально отриманий закон розподілу має асиметричне відхилення на 10 % у бік зменшення діючої сили.

7. Встановлено рівні швидкості руху відповідно до конструкції колії, при яких підрейкова основа не встигає реалізувати деформації по всій довжині формування прогину рейки, що призводить до принципових змін напружено-деформованого стану. При ґрунтах з невеликими модулями деформації (до 10 МПа) такі ефекти з'являються починаючи зі швидкості руху 210–250 км/год. Якщо земляне полотно складається з ґрунтів, які мають модуль деформації, достатній для забезпечення загального модуля пружності підрейкової основи на рівні 40–50 МПа і більше (що закладається в розрахунках колії на міцність), ефект неповної реалізації прогину рейки може з'явитися при доволі великих на сьогодні рівнях швидкості руху – 350–400 км/год.

8. Визначено принципи формування частини простору підрейкової основи, що взаємодіє з рухомим навантаженням, залежно від конструкції колії і швидкості руху поїздів. При високих значеннях швидкості руху динаміка зміни цієї області є одним із визначальних параметрів для моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії, обґрунтування розмірів розрахункового простору при застосуванні методів скінченних елементів, вирішення задач встановлення підсилюючих шарів, захисних споруд та ін. Для можливості виконання практичних розрахунків

отримано числові варіантні результати та сформовано математичні вирази для аналітичного визначення обрису підрейкової основи, що бере участь у взаємодії.

9. Розширено підходи представлення залізничної колії в моделях рухомого складу, описаних системами рівнянь за принципом Лагранжа–д’Аламбера. Отримано значення коефіцієнтів жорсткості й дисипації залізничної колії залежно від конструкції і швидкості руху. Так, для колії з модулем пружності підрейкової основи 50 МПа вони змінюються від $97 \cdot 10^3$ кН/м і 200 кН·с/м при швидкості руху 80 км/год до $101 \cdot 10^3$ кН/м і 65 кН·с/м при швидкості руху 280 км/год відповідно.

10. Обґрунтовано закономірності розвитку нерівностей колії. Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов’язково збігається з місцем розташування проблемної ділянки. З часом експлуатації вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та появою нових. Інтенсивність зростання амплітуди нерівності в місці її початкового утворення з часом експлуатації зменшується, але процес набуває розвитку в інших місцях, що, як правило, призводить до утворення так званих «ям» на підході до нерівнопружної ділянки.

11. Термін служби залізничної колії, особливо для ділянок швидкісного й високошвидкісного руху, не може визначатися тільки пропущеним тоннажем. Виконано теоретичні дослідження та отримано аналітичну методику для моделювання процесу накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи. Використання ентропії дало змогу описати старіння залізничної колії в міжремонтний період як випадковий процес накопичення деформацій у результаті динамічних реакцій на зовнішнє навантаження, виражених через показники механічної роботи. Така методика дає можливість враховувати параметри поїздопотоків, встановлені швидкості руху, характеристики конструкції колії тощо. Отримано коефіцієнти умовного збільшення пропущеного тоннажу для

врахування швидкості руху поїздів. Вони становлять від 1,1 до 1,5 для швидкостей руху пасажирських поїздів від 121 до 320 км/год відповідно. Своєчасне виконання ремонтів дає змогу запобігти непродуктивним експлуатаційним витратам, пов'язаним з погіршенням технічного стану ділянки, які в середньому складають 450 тис. грн/км на рік.

12. Нові методи, положення й результати наукових досліджень використані ПАТ «Укрзалізниця» для розробки заходів щодо впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів та увійшли в нормативні документи Департаменту колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» і ТОВ «Грузинська залізниця», а також набули практичного застосування під час проведення сертифікаційних випробувань швидкісного рухомого складу на залізницях України й Казахстану. Методика і результати досліджень, що наведені в дисертаційній роботі, використані для постановки кафедрою «Колія та колійне господарство» ДНУЗТ курсів лекцій і практичних занять з дисциплін «Проектування залізничної колії» і «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах».

БІБЛІОГРАФІЯ

1. ДБН В.2.3-19-2008 – Споруди транспорту. Залізниці колії 1520 мм. Норми проектування // Затверджено і надано чинності наказом Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 26.01.2008 р. №42. – Київ. 2008. – 142 с.
2. Директива № 96/48/ЄС від 23 липня 1996 р. Ради щодо сумісності транс'європейської високошвидкісної залізничної системи (ОВ L 235, 17.9.1996, з останніми змінами внесеними Директивою № 2007/32/ЄС (ОВ L 141, 2.6.2007), та зокрема (ОВ L 245, 12.9.2002) / Офіційний вісник Європейського Союзу // Official № L 77/105. – 2008.
3. ОСЖД. Топология и эксплуатационно–технические параметры сети скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий стран Восточной Европы в сообщении Европа–Азия. Обобщенный материал по предложениям членов ОСЖД. – Москва, 1997. – 54 с.
4. ОСЖД Р 786/2.1–е изд. «Технические нормативы по реконструкции и содержанию пути в сообщении Европа–Азия» / утв. совещ. V Комиссии ОСЖД. – Варшава, 1999. – 34 с.
5. ОСЖД Р–610/7 «Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий» / утв. совещ. V Комиссии ОСЖД. – Вильнюс, 2001. – 14 с.
6. Ершков О. П. Вопросы подготовки железнодорожного пути к высоким скоростям движения / О. П. Ершков. – Москва : Трансжелдориздат, 1959. – 126 с.
7. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения / под ред. М. А. Чернышова. – Москва : Транспорт, 1964. – 272 с.
8. Иоаннисян А. И. Улучшение трассы существующих железных дорог / А. И. Иоаннисян. – Москва : Транспорт, 1972. – 176 с.

9. Ginés de Rus Economic Analysis of High Speed Rail in Europe/ Ginés de Rus, Ignacio Barrón, Javier Campos, Philippe Gagnepain, Chris Nash, Andreu Ulied, Roger Vickerman //Fundación BBVA. – 2009. – Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao. – 140 p.
10. Отчет по НДР «Варианты освоения возрастающих пассажиропотоков за счет сооружения специализированной высокоскоростной магистрали Центр–Юг с учетом усиления существующих подходов к городам Днепропетровск, Запорожье и Донецк». Номер госрегистрации 01890030692. – Днепропетровск : ДИИТ, 1989. – 73 с.
11. Высокоскоростной железнодорожный транспорт Украины. Инженерная записка / И. М. Савилов, А. И. Сербин, Ю. Л. Земляной. – Днепропетровск : Днепрогипротранс, 1992. – 46 с.
12. Основные технические и технологические условия для проектирования и строительства высокоскоростной магистрали Киев–Харьков / Е. В. Черната, А. В. Лисенко. – Киев : Киевгипротранс, 2002. – 62 с.
13. Разработка рекомендаций по созданию скоростного железнодорожного транспорта Украины в рамках развития международных транспортных коридоров / рук. проекта чл.–кор. НАН Украины, д.т.н., проф. Ушкалов В. Ф. – Днепропетровск : Ин-т техн. механики НАН Украины, 2004. – 302 с.
14. Железные дороги мира в XXI веке / под общ. ред. Г. Н. Кирпы. – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2004. – 224 с.
15. Босов А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украин : монография / А. А. Босов, Г. Н. Кирпа. – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2004. – 144 с.
16. Бараш Ю. С. Економічна ефективність високошвидкісних пасажирських залізничних перевезень в Україні : монографія / Ю. С. Бараш, А. В. Момот. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Ла-заряна, 2015. – 137 с.

17. Гавриленков А. В. Теоретические основы проектирования скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей : монография / А. В. Гавриленков; под науч. ред. С. М. Гончарука. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2004. – 213 с.
18. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, О. М. Патласов, М. І. Карпов, В. П. Шраменко, О. І. Белорусов, В. О. Яковлев, В. М. Молчанов, К. В. Корноухова, М. Б. Курган, Д. М. Курган, В. М. Твердомед, Р. М. Йосифович, О. О. Сорока. – Київ, 2012. – 456 с.
19. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 1. – 456 с.
20. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
21. Даніленко, Е. І. Розрахунок залізничної колії на міцність і стійкість. / Е. І. Даніленко. – К. – 2000. – 164 с.
22. Даніленко Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
23. Даниленко Э. И. Стрелочные переводы железных дорог Украины (Технология производства, эксплуатация в пути, расчеты и проектирование) / Э. И. Даниленко, А. П. Кутах, С. Д. Тараненко : Киевский ин-т ж.-д. трансп. – К.: 2001. – 296 с.
24. Даніленко Е. І. Розрахунок характеристик жорсткості та пружності рейкової нитки при крученні під дією вертикальних і горизонтальних сил / Е. І. Даніленко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – № 5(65). - С. 79-91.
25. Даніленко Е. І. Експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості і модуля пружності залізничної

- колії при різних конструкціях рейкових скріплень / Е. І. Даніленко, В. П. Велінець // Залізн. трансп. України. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
26. Даніленко Е. І. Новітні дослідження бічної пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 65–77.
27. Даниленко Э. И. Теоретическое решение задачи по определению реального бокового модуля упругости пути, при совместном действии на рельсовую нить горизонтальных и вертикальных сил / Э. И. Даниленко, В. П. Велинец // Зб. наук. пр. Держ. економ.-техн. ун-ту трансп. Серія: Трансп. системи і технології. – Київ, 2014. – Вип. 24. – С. 106–122.
28. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Д. : Новая идеология, 2002. – 240 с.
29. Математическое описание силового взаимодействия колес и рельсов / Л. Н. Дегтярева, Ю. И. Осенин, С. В. Мямлин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 21–24.
30. Myamlin S. V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, Ye. O. Pysmennyi // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137.
31. Myamlin S. et al. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie //Transport. – 2015. – Т. 30. – №. 1. – С. 88-92.
32. Мямлин С. В. Математична модель коливань колісної пари з незалежним обертанням коліс в горизонтальній площині / S. Myamlin, О. Kirilchuk, V. Metyzhenko // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – N 4(64). - С. 134-141.
33. Ушкалов В. Ф. Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // Залізн. трансп. України. – 2012. – № 1. – С. 38–41.

34. Ушкалов В. Ф. Про вимірювання вертикальних сил під час проведення ходових технічних випробувань вантажних вагонів / V. Ushkalov, S. Kostritsa, A. Sultan, S. Pasichnik, Ye. Fedorov, Ye. Dzichkovskiy // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2009. – N 30. - С. 243-247.
35. Ушкалов В. Ф. Розрахункові збурення для оцінки динамічних якостей вантажних вагонів / V. Ushkalov, L. Lapina, I. Mashchenko // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – N 4(46). - С. 135-144.
36. Петренко В. Д. Аналіз стійкості земляного полотна для реалізації умов його безпеки при підвищенні швидкості руху / В. Д. Петренко, О. Л. Тюткін, В. П. Купрій // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. — 2015. — № 9. — С. 76—85.
37. Петренко В. Д. Дослідження підвищення несучої здатності земляного полотна для швидкісного руху потягів / V. D. Petrenko, V. P. Kupriy, M. A. Lysnevskyy, A. M. Alhdur // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – №. 2. – С. 50-55.
38. Петренко В. Д. Аналіз стійкості земляного полотна для реалізації умов його безпеки при підвищенні швидкості руху / V. Petrenko, O. Tiutkin, V. Kupriy // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – N 9.
39. Петренко В. Д. Estimation of Subgrade Strengthening Influence Using Soilcement Elements/ V. Petrenko, O. Tiutkin, I. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – N 4(64). - С. 161-168.
40. Радченко Н. А. Криволинейное движение рельсовых транспортных средств. – Киев: Наук. думка, 1988. – 213 с.
41. Радченко Н. А., Звонарева О.В., Малый В.В. Оценка колебаний электродинамических транспортных средств при небольших скоростях движения // Техническая механика.– 2007. – № 2. – С.138 – 141.

42. Радченко Н. А. Колебания и устойчивость движения электродинамического транспортного средства при разгоне //Техническая механика. – 2008. – №. 1. – С. 146-152.
43. Даренський О. М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту //Харків: УкрДАЗТ. – 2011. – 204 с.
44. Даренський О. М. Моделювання рейкошпальної основи залізниць незагального користування методом кінцевих елементів / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, А. М. Бадражан //Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. – №. 147. – С. 113-118.
45. Даренський О. М. Застосування методу кінцевих елементів для визначення раціональних способів посилення рейкошпальної основи / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – №. 4.
46. Даренский А. Н. Особенности расчетов взаимодействия пути и подвижного состава в зоне рельсовых стыков при дискретном подрельсовом основании / А. Н. Даренский, А. В. Клименко //Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – №. 9 (1). – С. 50-54.
47. Тютюкін О. Л. Теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища //Вісник ДНУЗТу.–Д.: Вид-во ДНУЗТу. – 2008. – С. 201-206.
48. Тютюкин А. Л. Сравнительный анализ конечно-элементных моделей свайного фундамента при взаимодействии с основанием / А. Л. Тютюкин, А. В. Гулак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лаза-ряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 32. – С. 122–126.
49. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf.

50. Бонадренко І. О. Підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2006. 21 с.
51. Талавіра Г. М. Особливості роботи залізничної колії на перехідних ділянках примикання до мостів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. К. 2007. 24 с.
52. Баль О. М. Підвищення ефективності ведення рейкового господарства за показниками надійності. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2008.
53. Костюк М. Д. Удосконалення конструкцій і технологій верхньої будови колії для сучасних умов експлуатації залізниць України. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2008. 26 с.
54. Сисин М. П. Вплив фізичних та геометричних характеристик залізничної колії на її напружено-деформований стан. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2008. 26 с.
55. Харлан В. І. Вибір раціональних швидкостей руху пасажирських поїздів на ділянках міжнародних транспортних коридорів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2010. 21 с.
56. Арбузов М. А. Вдосконалення системи контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2010. 25 с.
57. Теврдомед В. М. Вплив поперечних та поздовжніх горизонтальних сил на роботу безпідкладкової та підкладкової конструкції рейкової колії.

- Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. К. 2010. 21 с.
58. Чернишова О. С. Підвищення ефективності заходів зі зменшення обмежень швидкості руху поїздів, зумовлених станом залізничної колії. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2010. 22 с.
59. Губар О. В. Обґрунтування норм улаштування та утримання колії для кривих з радіусами менше 350 метрів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2011. 26 с.
60. Каленик К. А. Удосконалення нормативів утримання бокового напрямку стрілочних переводів за шириною колії та у плані. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2011. 25 с.
61. Гусак М. А. Підвищення ефективності роботи залізничної колії при спеціалізації напрямків для вантажних і пасажирських перевезень. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2012. 24 с.
62. Набоченко О. С. Підвищення ефективності роботи щебеневого баластного шару залізничної колії. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2013. 27 с.
63. Панченко П. В. Обґрунтування норм утримання залізничної колії у плані при прискореному русі. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2014. 23 с.
64. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.umlub.ru>.
65. Курган М. Б. Наукові основи перебудови існуючих залізниць України для впровадження швидкісного руху поїздів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н. Дніпропетровськ. 2004.
66. Вострухов А. В. Динамика железнодорожного пути с учетом волн в грунте. Автореферат дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.06. Нижний Новгород. 2001. – 22 с.

67. Суворова Т. В. Динамическое взаимодействие систем полуограниченных и ограниченных деформируемых тел, моделирующих железнодорожный путь и объекты инфраструктуры. Автореферат дис. д.ф.-м.н.: 01.02.04. Краснодар. 2004. – 46 с.
68. Курган Д. Н. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Н. Курган, И. А. Бондаренко // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – № 159. – Р. 99-111.
69. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Зб. наук. пр. ДЕТУТ «Транспортні системи і технології». – Київ, 2011. – Вип. 18. – С. 14–18.
70. Даренський О. М. Наукові основи підвищення ресурсів роботи промислового транспорту на основі прогнозування стану системи «екіпаж – рейкова колія». Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н. Луганськ. 2012. 37 с.
71. Бугаєць Н. В. Підвищення несучої здатності рейкошпальної основи залізничних колій незагального користування. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2014. 20 с.
72. Connolly D. Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments / D. Connolly, A. Giannopoulos, M. Forde // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. –2013. – Vol. 46. – P. 13–19.
73. Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations / G. Kouroussis, L. Van Parys, C. Conti, O. Verlinden // Advances in Engineering Software. – 2014. – Vol. 70. – P. 63–76.
74. Курган Д. М. Моделювання життєвого циклу системи на основі ентропії системи / Д. М. Курган // 6-та науково-практ. міжнародна конф. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – С. 100–101.

75. Woldringh R. F. Embankment design for high-speed trains on soft soils / R. F. Woldringh, B. M. New // Proc. of the 12th Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (7.06–10.06.1999). – Amsterdam, The Netherlands, 1999. – Vol. 3. – P. 1703–1712.
76. Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities / V. V. Krylov, A. R. Dawson, M. E. Heelis, A. C. Collop // Proc. of The Institution of Mechanical Engineers Part F–journal of Rail and Rapid Transit – PROC INST MECH ENG F–J RAIL R. – 2000. – Vol. 214, № 2. – P. 107–116.
77. Koch E. A mélykeveréses technológia vasútépítési alkalmazásának lehetőségei / E. Koch, R. Szepesházi // SÍNEK VILÁGA. – 2013. – № 2. – P. 9–14.
78. Брандль Х. Взаимодействие оснований и сооружений высокоскоростных железных дорог / Х. Брандль, А. Паульмичл // Мат. международной XIII Дунайско-Европейской конф. по геотехнике, г. Любляна, Словения, 29–31 мая 2006 г. // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2007. – № 11. – С. 157–164.
79. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : Наука, 1987. – 248 с.
80. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1986. – 559 с.
81. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах) / под ред. Н. В. Колодяжного. – Москва : Транспорт, 1976. – 416 с.
82. Курган Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі розповсюдження напружень в залізничній колії / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2016. – № 5(65). – С. 101–113.
83. Александров В. М., Чебаков М. И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. – М.: Физматлит. – 2004. – 304 с.

84. Александров А. Я. Пространственные задачи теории упругости (применение методов теории функций комплексного переменного) / А. Я. Александров, Ю. И. Соловьев – М.: Наука. – 1978. – 464 с.
85. Бленд Д. Нелинейная динамическая теория упругости. – М.: Мир. – 1972. – 184 с.
86. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости / Под ред. В. Д. Купрадзе. – М. – 1976. – 664 с.
87. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. – М. – 1955. – 496 с.
88. Лурье А. И. Теория упругости. – М. – 1970. – 940 с.
89. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М. – 1966. – 708 с.
90. Филоненко-Бородич М. М. Теория упругости. – М.: Физматлит. – 1959. – 364 с.
91. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. – 638 с.
92. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы. – 254 с.
93. Весницкий А. И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. – М.: Физматлит. – 2001. – 320 с.
94. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах / Г. Кольский. – Москва : Иностр. лит-ра, 1955. – 192 с.
95. Дейвис Р. М. Волны напряжений в твердых телах. – М. 1961. – 104 с.
96. Ерофеев В. И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой. – М. – 1999. – 328 с.
97. Ерофеев В. И. Волны в стретнях. Дисперсия. Нелинейность / В. И. Ерофеев, В. В. Кажаяев, Н. П. Семерикова – М.: Физматлит. – 2002. – 208 с.
98. Ивлев Д. Д. Метод возмущений в теории упругопластичного тела / Д. Д. Ивлев, Л. В. Ершов – М.: Наука. – 1978. – 208 с.
99. Новацкий В. К. Волновые задачи теории пластичности. – М.: Мир. – 1978. – 312 с.

100. Шардаков И. Н. Метод геометрического погружения в теории упругости / И. Н. Шардаков, Н. А. Труфанов, В. П. Матвеевко – Екатеринбург. – 1999. – 298 с.
101. Даренський О. М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій / О. М. Даренський, Е. А. Беліков //Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2016. – №. 154. С. 149-155.
102. Правила производства расчетов перхнего строения железнодорожного пути на прочность. М.: Трансжелдориздат, 1954. – 70 с.
103. Виброзащитные конструкции пути для транспортных тоннелей и метрополитенов / Н. И. Карпущенко, А. В. Яковлев, Д. В. Величко, В. А. Гурский. – Новосибирск : Наука, 2011. – 200 с.
104. Чернышов М. А. Практические методы расчета пути / М. А. Чернышов. – Москва : Транспорт, 1967. – 236 с.
105. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1997. – 326 с.
106. Бесстыковой путь и длинные рельсы / В. Г. Альбрехт, В. Н. Лященко, С. П. Першин, В. Я. Шульга. – Москва : Транспорт, 1963. – 214 с.
107. Курган Д. М. Адаптація енергетичного методу оцінки безпеки утримання безстикової колії за показником стискаючої сили для інженерних розрахунків / Д. М. Курган, Н. М. Лапшева // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – №. 6. – С. 41–46.
108. Курган М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган // –Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2016. – 283 с.
109. Lichtberger B: Thack compendium. Eurailpress Tetzlaff–Hestra GmbH & Co. KG. – Hamburg, 2005. – 634 p.
110. Курган Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту.

- Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 3 (57). – С. 118–128.
111. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // *Acta Technica Jaurinensis*. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83–96.
112. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериге, В. Н. Данилов, М. А. Фришман. – Москва : Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.
113. Вериге М. Ф. Основные положения методики расчета сил, действующих на железобетонные шпалы / М. Ф. Вериге // *Тр. ЦНИИ*. – Москва : Транс-желдориздат, 1963. – Вып. 257. – С. 5–39.
114. 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 // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 1 (43). – С. 139–148.
115. Railway construction / S. Fischer, B. Eller, Z. Kada, A. Németh; Universitas–Győr Nonprofit Kft. – Győr, 2015. – 334 p.
116. Гавриленко А. К. Учет жесткости железнодорожного пути / А. К. Гавриленко // *Путь и путевое хозяйство: научно-популярный, производственно-технический журнал*. – 2007. – №4. – С.37–39.
117. Савин А. Переход от балластного пути к безбалластному / А. Савин // *Українські залізниці*. – 2014. – № 3 (9). – С. 56-59.
118. Талавіра Г. М. Осідання основної площадки земляного полотна від рухомого складу на перехідних ділянках перед штучними спорудами / Г. М. Талавіра // *Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту: Серія «Транспортні системи і технології»*. – Вип. 4. – К.: КУЕТТ, 2003. – С. 80-84.

119. Климов В. И. Статический расчет пути как балки на опорах с нелинейной жесткостью / В. И. Климов, В. В. Рыбкин // Труды ДИИТ–1984– № 235/26. – С. 3-8.
120. Сисин М. Дослідження динамічних коливань балки на пружній дисипативній основі під дією рухомого навантаження при проходженні силової нерівності колії / М. Сисин, В. Рибкін, О. Патласов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2004. – N 5. - С. 188-193.
121. Behandlung des Schotters als Vielkörper System mit wechselnden Bindungen / Holger Kruse, Karl Popp, Hans-Georg Matuttis, Alexander Schinner // Eisenbahningenieur, 2001. – №2. – pp. 30-34.
122. Gerstberger U. Modellierung des Schotters in der Gleisdynamik / Ulf Gerstberger, Klaus Knothe, Rowena Sielaff-Opoku // Eisenbahningenieur, 2003. – №9 (54). – pp. 24-30.
123. Курган М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96.
124. Kurhan D. M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 2(56). – P. 136–145.
125. Курган Д. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава с учетом времени прогиба подрельсового основания / Д. Курган // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – Вып. 3. – С. 167–175.
126. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Наука та прогрес

транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 4 (58). – С. 99–109.

127. Корженевич І. П. Оценка достоверности основных параметров железнодорожных кривых при установлении по ним допускаемой скорости движения поездов / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, М. Г. Ренгач, Д. М. Курган / Будівництво. Збірник наукових праць ДІІТу. Випуск 10. – Дніпропетровськ, 2002. – С.28-34.
128. Босов А. А. Вирішення задачі оптимальної перебудови ділянки для організації швидкісного руху поїздів / А. А.Босов, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган / Транспорт. Збірник наукових праць ДІІТу. Випуск 12. – Дніпропетровськ, 2002. – С.43-49.
129. Курган Д. М. К вопросу определения параметров кривой по ленте путеизмерительного вагона / / Збірник наукових праць ДНУЗТ. Випуск 10. – Дніпропетровськ, 2002. – С.76-82.
130. Рационалізація перебудови кривих в плані при підвищенні швидкостей руху поїздів / В. В.Рибкін, М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 120–126.
131. Аналіз можливості застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів при організації швидкісного руху / А. П. Зубко, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 4. – С. 156–164.
132. Курган М. Б. Визначення допустимої швидкості руху поїздів з примусовим нахилом кузовів вагонів у кривих ділянках колії / М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 47–52.
133. 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 // Вісн.

- Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 41–44.
134. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотoku на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 19. – С. 78–83.
135. Kurhan M. Forecasting of Passenger Traffic upon Implementation of High-Speed Running / M. Kurhan, D. Kurhan // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2017. – № 1(67). – P. 117–130.
136. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 20. – С. 233–239.
137. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 88–93.
138. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 124–128.
139. Оцінка економічної ефективності усунення обмежень швидкості руху поїздів, пов'язаних із станом залізничної колії / А. А. Босов, М. Б. Курган, Д. М. Курган, С. Ю. Байдак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 106–115.
140. 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 // Зб. наук. пр. – Донецьк : ДонІЗТ, 2012. – Вип. № 31. – С. 225–230.

141. Бабенко А. І. Встановлення допустимої швидкості на складних ділянках плану залізниці з урахуванням комфортабельності їзди / А. І. Бабенко, Д. М. Курган, М. М. Черняков // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технічн. ун-ту трансп. «Транспортні системи і технології». – Київ, 2012. – Вип. 21. – С. 9–15.
142. Методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів на складних ділянках плану залізниці / М. Б. Курган, Д. М. Курган, Н. П. Хмилевська, С. Ю. Байдак // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – N 2 (50). – С. 83–94.
143. Курган Н. Б. Усиление однопутного железнодорожного направления при ограниченных капитальных вложениях / Н. Б. Курган, Д. Н. Курган, О. Ф. Лужицкий Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. С. 52-62.
144. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99.
145. Курган Д. Н. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава с учетом времени прогиба подрельсового основания / Д. Н. Курган // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. — Хабаровск, 2015. — Вып. 3. — С. 167-175.
146. Kurhan D. Modeling Of Development Vertical Deformation Of Railway Track / D. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – № 1(61). – С. 100–108.
147. Курган Д. М. Діагностування і виправка положення залізничної колії колійними машинами / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // Українська залізниця. – 2016. – № 8(38). – С. 60–64.

148. Курган Д. М. Оцінка безпеки руху за умови забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки / Д. М. Курган, В. О. Губар // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 65–72.
149. Курган Д. Н. К вопросу определения уравнения прогиба рельса для современных расчетов / Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. – Вып. 4. – С. 251-258.
150. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. ЦП-0236 / М. Курган, А. Орловський, О. Патласов, В. Циганенко, Д. Курган. – Київ, 2011. – 52 с.
151. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України. ЦП-0266 / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. І. Белоусов, М. І. Карпов, Д. М. Курган, В. П. Шраменко, А. І. Бабенко, В. А. Штойко, І. О. Олійник, В. А. Лисак, К. Л. Каленик. – Київ, 2012. – 147 с.
152. Фришман М. А. Исследование изменения вертикальной жесткости пути по его длине / М. А. Фришман, И. С. Леванков. Исследование взаимодействия пути и подвижного состава. – Труды ДИИТ вып.138, Д., 1972. – С. 48-57.
153. Малявко А. М. Устройство для экспериментального определения упругих характеристик пути / Вопросы исследования пути. – Труды МИИТ, вып.210, М., 1965. – С. 80-93.
154. Сисин М. П. Вимірювання жорсткості колії із використанням відео зйомки / М. П. Сисин, М. І. Уманов. Труды 67 Международной научно-практической конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта". – Д., 2007. – С. 189-190.
155. Гавриленко А. К. Использование данных современных путеизмерительных средств для определения вертикальной жесткости пути / А. К. Гавриленко, М. Н Смердов. Труды научно-практической

конференции «Повышение эффективности работы путевого хозяйства и инженерных сооружений железных дорог» – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – С. 199.

156. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Затверджено наказом Держстандарту України №31 від 22.01.1995р. Київ, Держстандарт України 1995. – 124 с.
157. Гурский Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики / Е. И. Гурский – Москва : Высш. школа. 1971. – 328 с.
158. Рибкін В. В. Надійність залізничної колії : навчальний посібник / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 154 с.
159. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. ЦП–0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук, С. О. Соломаха, П. В. Панченко. – Київ, 2012. – 25 с.
160. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України. ЦП–0287 / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсеєнко, О. Патласов, В. Яковлев. – Київ, 2015. – 45 с.
161. Гавриленко А. К. Учет жесткости железнодорожного пути / А. К. Гавриленко // Путь и путевое хозяйство: научно-популярный, производственно-технический журнал. – 2007. – №4. – С.37–39.
162. Талавіра Г. М. Осідання основної площадки земляного полотна від рухомого складу на перехідних ділянках перед штучними спорудами / Г. М. Талавіра // Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 4. – К.: КУЕТТ, 2003. – С. 80-84.
163. Szabó, L. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures / L. Szabó, M. Somogyi, G. Horváth // Acta Technica Jaurinensis. – 2015. – № 2. – P. 96-112.
164. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием суперЭВМ / В. П. Соловьев, А. В. Анисин, С. С.

- Надежин, В. О. Певзнер, И. В. Третьяков // Сборник трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» «Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта» под ред. Б. М. Лapidуса, М. – 2013. – С. 185–192.
165. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, С. С. Надежин // Бюл. ОУС ОАО «РЖД». – Москва, 2014. – № 4. – С. 21–29.
166. Данович В. Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт: Сб. научн. тр. ДИИТа. – Д., 2001. – Вып. 8. – С. 124–138.
167. Fischer S. Superstructure Stabilization of Ballast Bedded Railway Tracks with Geogrids / S. Fischer, F. Horvát //Hungarian J. of Industry and Chemistry. – 2011. – Vol. 39, №. 1. – P. 101–106.
168. Horvát F. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests / F. Horvát, S. Fischer, Z. Major //Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – Vol. 6, №. 2. – P. 21–44.
169. Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities / V. V. Krylov, A. R. Dawson, M. E. Heelis, A. C. Collop // Proc. of The Institution of Mechanical Engineers Part F–journal of Rail and Rapid Transit – PROC INST MECH ENG F–J RAIL R. – 2000. – Vol. 214, № 2. – P. 107–116.
170. Гиляров В. Л. Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов / В. Л. Гиляров // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, вып. 5. – С. 808–811.

171. Коновалов А. А. Энтропия, деформация, теплоемкость и жизненный цикл [Электронный ресурс] / А. А. Коновалов. – Режим доступа: <http://trinitas.ru/rus/doc/0016/001c/1840-kon.pdf>.
172. Куриленко Г. А. Прогнозирование циклического ресурса деталей с макротрещинами термографическим методом / Г. А. Куриленко // Изв. Томского техн. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 2. – С. 36–39.
173. Расчет долговечности упруго-наследственных сред при длительном циклическом нагружении / В. И. Дырда, С. П. Сокол, Е. В. Калганков, В. А. Колбасин, А. В. Толстенко // Геотехнічна механіка. – 2013. – № 108. – С. 111–122.
174. Регель В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 106, вып. 2. – С. 193–228.
175. Jiang H. C. Identifying topological order by entanglement entropy / H. C. Jiang, Z. Wang, L. Balents // Nature Physics. – 2012. – Val. 8. – P. 902–905.
176. Maximum entropy fracture model and its use for predicting cyclic hysteresis in Sn₃.8Ag_{0.7}Cu and Sn₃.0Ag_{0.5} solder alloys / J. P. Tucker, D. K. Chan, G. Subbarayan, C. A. Handwerker // Microelectronics Reliability. – 2014. – Val. 54 (11). – P. 2513–2522.
177. Thermodynamical property of entanglement entropy for excited states. / J. Bhattacharya, M. Nozaki, T. Takayanagi, T. Ugajin // Physical review letters. – 2013. – Val. 110 (9). – P. 091602.
178. Holder D. E. Quantification of Lateral Forces in Concrete Sleeper Fastening Systems Under Heavy Haul Freight Loads.
179. Manda K. R. et al. Vertical load path under static and dynamic loads in concrete crosstie and fastening systems //2014 Joint Rail Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2014. – C. V001T01A025-V001T01A025.
180. Курган Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украин / Н. Б. Курган // Українські залізниці. – 2015. – № 5–6. – С. 16–21.

181. Лапина Л. Г. Анализ статистических характеристик просадок рельсовых нитей и построение базовых неровностей пути / Л. Г. Лапина // Техн. механика. – 2013. – №. 1. – С. 17–24.
182. Уманов М. И. Совершенствование оценки состояния пути с использованием среднеквадратических отклонений его геометрических параметров / М. И. Уманов, А. М. Патласов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 109–114.
183. Fischer S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast. / S. Fischer // Science And Transport Progress. Bulletin Of Dnipropetrovsk National University Of Railway Transport. – 2015. - № 5(59). – P. 97-106.
184. Petrenko V. Simulation of subgrade embankment on weak base / V. Petrenko, I. Sviatko // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 4(58). – P. 198-204.
185. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути. / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Наука та прогр. трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – №. 5 (47). – С. 97–104.
186. Розробка концепції впровадження швидкісного та високошвидкісного руху пасажирських поїздів на залізницях України в 2005–2015 роках / Дніпропетр. нац. ун-т. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2004. – 127 с.
187. Курган М.Б. Пілотні проекти високошвидкісних магістралей в Україні // Українські залізниці. – 2015. № 11-12 (29-30). – С. 36-39.
188. Безбалластный путь на высокоскоростных магистралях [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.ssf-ing.de/fileadmin/web_data/downloads/projectlist_rus/SSF_Folder_ballastless-track_rus.pdf.
189. Колос А. Ф. Особенности напряженного состояния грунтов подплитного основания при безбалластной конструкции верхнего строения пути / А.

- Ф. Колос, А. А. Сидоренко, С. В. Соловьев // Инженерный вестн. Дона. – 2014. – Т. 29, №. 2. – С. 108.
190. Замуховский А. В. Перспективы полигона безбалластного пути / А. В. Замуховский // Мир транспорта. – 2013. – № 3. – С. 168–172.
 191. Каменский В. Б. Направления совершенствования системы ведения путевого хозяйства / В. Б. Каменский. – Москва : НИИТКД, 2009. – 392 с.
 192. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./Ред. В. Н. Челомей (пред). — М.: Машиностроение, 1980 — Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов/ Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. 1980. – 544 с
 193. Вершинский С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челпоков. – Москва : Транспорт, 1972. – 304 с.
 194. Nguen K. Dynamic Analysis of High Speed Railway Traffic Loads on Ballasted Track / K. Nguen, J. M. Goicolea, F. Galbadon // Режим доступа: <http://oa.upm.es/id/eprint/13126/contents>
 195. Даренский А. Н. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава при дискретном подрельсовом основании в зоне рельсовых стыков / А. Н. Даренский, А. В. Клименко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – №4(101). – С. 15-22.
 196. Математична статистика / В. М. Иванова, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова, И. О. Решетникова. – М.: Высш. школа. – 1981. – 371 с.
 197. William Sugrue, Permanent Way for High Speed Lines, UIC – Paris, 03 June 2013.
 198. Безбалластный путь на высокоскоростных магистралях [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ssf-ing.de/fileadmin/web_data/downloads/projectlist_rus/SSF_Folder_ballastless-track_rus.pdf
 199. Колос А. Ф. Современные конструкции верхнего строения пути для строительства скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий / А. Ф. Колос, И. С. Козлов //Бюл. результатов научных исследований. – 2013. – № 1–2 (6–7). – С. 6–12.

200. Клименко А. В. Підвищення ресурсів роботи залізничних колій незагального користування за рахунок вдосконалення утримання рейкових стиків. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – Київ. – 2015. – 26 с.
201. Маркуль Р. В. Розробка технології контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – Дніпропетровськ. – 2015. – 26 с.
202. Демченко В. О. Вплив профілю колісного бандажа на силову взаємодію з рейковою колією. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – Київ. – 2014. – 22 с.
203. Каменский В. Б. Содержание железнодорожного пути в кривых / В. Б. Каменский, Э. Я. Шац – М.: Транспорт, 1987. –188 с.
204. Сопряжения кривых и особенности движения подвижного состава по ним / Под ред. д-ра техн. наук О. П. Ершков – М.: Транспорт, – 1973. – 96 с. – (Тр. ЦНИИ МПС; Вып. 500).
205. UIC Code 513 R (1-st edition, 1.7.94). Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. - Paris : Int. Union of Railways, 1995. - 81 p.
206. Методичні вказівки щодо порядку службового розслідування причин сходжень рухомого складу з рейок на залізницях України ЦРБ-0036 / затв. наказом Укрзалізниці від 21.06.2012 № 194-ЦЗ. - К. : НВП Поліграфсервіс, 2012. - 251 с.
207. Камаев А. А. Взаимодействие локомотива и пути в кривых участках пути / А. А. Камаев, Г. С. Михальченко. – Тула. – 1977. – 68 с.
208. Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм ЦП-0235 / В.В. Рибкін, А.М. Орловський, В.В. Циганенко, В.Є. Савлук – Київ, ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 72 с.
209. Корженевич И. П. Определение плавности и комфортабельности езды в кривых на участках скоростного движения / И. П. Корженевич,

- Н. Б. Курган, Д. Н. Курган // Материалы науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 431–439.
210. Уманов М. І. Теоретические и экспериментальные исследования по установлению допускаемых скоростей движения поездов по участку пути, отремонтированному с применением современных путевых машин / М.І.Уманов, В.В.Циганенко, А.Г.Редмейстер, Н.В.Халіпова, М.Г.Ренгач, Д. М. Курган, В.В.Ковалев, М.П.Сисін / Труды межд. науч.-техн. конф. «Современные проблемы путевого комплекса. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований». – М, 2004. С. III-10–III-11.
211. Уманов М. І. Допускаемые скорости движения пассажирских поездов в кривых участках пути, отремонтированных с использованием современных путевых машин / М.І.Уманов, А.Г.Редмейстер В.В.Циганенко, Д. М. Курган, М.П.Сисін, Н.В.Халіпова / Труды 3-й научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М., 2006. С. 178-181.
212. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // 69-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2009. – С. 160–161.
213. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // 70-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 180–181.
214. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // 71-ша Міжнародна

науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 176–177.

215. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 177–178.
216. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології. Матеріали VI Міжнародної науково-практ. конф. – Київ : ДЕДУТ, 2013. – С. 96.
217. Курган, Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Проблеми взаємодії колії та рухомого складу. Праці міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 73–74.
218. Бондаренко І. О. До вирішення задач прогнозування стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / Бондаренко І.О., Д. М. Курган / Проблеми взаємодії колії та рухомого складу. Праці міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ. 2013. С. 74-75.
219. Бондаренко І. О. Стосовно питань визначення надійності роботи земляного полотна залізничної колії / Бондаренко І.О., Д. М. Курган / Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. 74 Міжнародна науково-практична конференція. – Дніпропетровськ. 2014. С. 254-255.
220. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність з урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. 74-та

- Міжнародна науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 256–257.
221. Курган М. Б. Основні вимоги до вибору форми і довжини перехідних кривих при проектуванні високошвидкісних магістралей / Курган М. Б., Д. М. Курган / Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. 74 Міжнародна науково-практична конференція. – Дніпропетровськ. 2014. С. 253-254.
222. Курган Д. М. Особливості сприйняття залізничною колією динамічного навантаження при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 221–222.
223. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 222–223.
224. Курган М. Б. Розвиток нерівностей залізничної колії в зонах нерівнопружності на прикладі переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // 78-ма Міжнародна конф. «Транспортне будівництво та залізнична колія». – Харків, 2016. – С. 93–94.
225. Kurhan D. M. Perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // XIV міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2016. – С. 74–75.
226. Курган Д. Н. К вопросу определения уравнения прогиба рельса для современных расчетов // Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития транспортной инфраструктуры дальнего востока». ДВГУПС. – 2016. С. 8.
227. Курган М. Б. Виникнення і розвиток нерівностей перед мостами як наслідок зміни пружності залізничної колії / Курган М. Б., Курган Д. М. // V Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». Д. – 2016. С. 5.

228. Тимошенко С. П. Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. Наука. – 1975. – 704 с.
229. Булат-Корнейчук Е. А. Научные открытия в механике разрушения / Булат-Корнейчук Е. А., Дырда В. И. – Днепропетровск. – 2006. – 245 с.
230. Потапов Д. О. Планування періодичності та обсягів колійних робіт на підставі даних вагонів-колієвимірювачів / Д. О. Потапов, В. Г. Вітольберг, О. В. Падалка //Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2016. – №. 162. – С. 66-71.
231. Connolly D. P. Use of Conventional Site Investigation Parameters to Calculate Critical Velocity of Trains from Rayleigh Waves / D. P. Connolly, M. C. Forde //Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2015. – №. 2476. – С. 32-36.
232. Connolly D. P. Benchmarking railway vibrations—Track, vehicle, ground and building effects //Construction and Building Materials. – 2015. – Т. 92. – С. 64-81.
233. Connolly D. P. Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model //Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2014. – Т. 58. – С. 37-47.
234. Connolly D. Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations //Construction and Building Materials. – 2013. – Т. 44. – С. 557-564.
235. Kouroussis G. Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration //Science of the Total Environment. – 2016. – Т. 557. – С. 110-122.
236. Амензаде Ю. А. Теория упругости. М.: Высшая школа. – 1976. – 272 с.
237. Вленд Д. Нелинейная динамическая теория упругости. М.: Мир. – 1972. – 184 с.
238. Партон В. З. Методы математической теории упругости / В. З. Партон, П. И. Перлин – М.: Наука. – 1981. – 688 с.

239. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир. – 1989. – 510 с.
240. Krylov V. V. Assessment of locations along the proposed HS2 Routes that are likely to experience ground vibration boom from high-speed trains / V. V. Krylov, B. Lewis // Proceedings of the Institute of Acoustics. – 2016 – № 38(1). – pp. 453-464.
241. Krylov V. V. Focusing of ground vibrations generated by high-speed trains travelling at trans-Rayleigh speeds // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2017. – Т. 100. – Р. 389-395.
242. Юрковський Є. Фактор розвитку / Є. Юрковський // Магістраль. – 2014. – Вип. 15.01.14. Режим доступу: <http://magistral-uz.com.ua/articles/faktor-rozvitku.html>

ДОДАТОК А
ВВЕДЕНИЯ В МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИЧНОГО ОБРИСУ ОБ'ЄКТУ

Введення в модель геометричного обрису об'єкту показано на прикладі залізобетонної шпали ІІІ-1-1

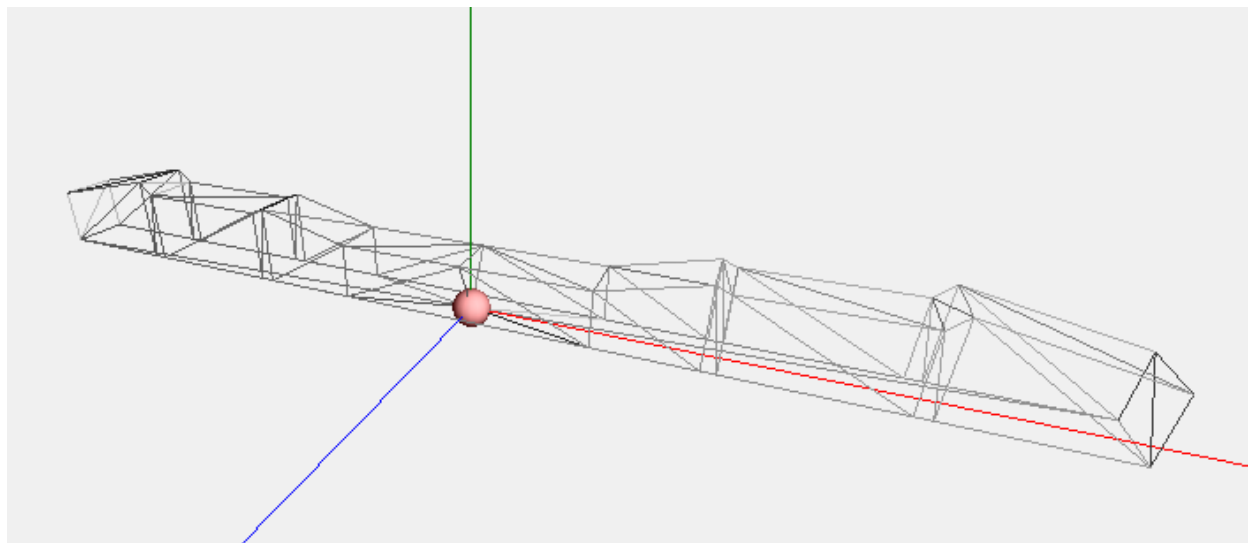


Рис. А.1 Залізобетонна шпала, як приклад обмеження простору об'єктом

Таблиця А.1 – Матриця координат вершин трикутників, які описують поверхню шпали

x	y	z	x	y	z	x	y	z
-1.35	0	0.075	-1.35	0	-0.075	1.35	0	-0.075
-1.35	0	0.075	1.35	0	0.075	1.35	0	-0.075
-1.35	0	0.075	-1.35	0.155	0.075	-1.35	0.155	-0.075
-1.35	0	0.075	-1.35	0	-0.075	-1.35	0.155	-0.075
1.35	0	0.075	1.35	0.155	0.075	1.35	0.155	-0.075
1.35	0	0.075	1.35	0	-0.075	1.35	0.155	-0.075
-1.35	0	0.075	-1.35	0.155	0.075	-1.02	0.229	0.075
-1.35	0	0.075	-1.02	0	0.075	-1.02	0.229	0.075
-1.02	0	0.075	-1.02	0.229	0.075	-0.985	0.193	0.075
-1.02	0	0.075	-0.985	0	0.075	-0.985	0.193	0.075
-0.985	0	0.075	-0.985	0.193	0.075	-0.615	0.193	0.075
-0.985	0	0.075	-0.615	0	0.075	-0.615	0.193	0.075
-0.615	0	0.075	-0.615	0.193	0.075	-0.58	0.207	0.075
-0.615	0	0.075	-0.58	0	0.075	-0.58	0.207	0.075
-0.58	0	0.075	-0.58	0.207	0.075	-0.33	0.145	0.075
-0.58	0	0.075	-0.33	0	0.075	-0.33	0.145	0.075
-0.33	0	0.075	-0.33	0.145	0.075	0	0.145	0.075
-0.33	0	0.075	0	0	0	0	0.145	0.075
1.35	0	0.075	1.35	0.155	0.075	1.02	0.229	0.075
1.35	0	0.075	1.02	0	0.075	1.02	0.229	0.075
1.02	0	0.075	1.02	0.229	0.075	0.985	0.193	0.075
1.02	0	0.075	0.985	0	0.075	0.985	0.193	0.075
0.985	0	0.075	0.985	0.193	0.075	0.615	0.193	0.075
0.985	0	0.075	0.615	0	0.075	0.615	0.193	0.075
0.615	0	0.075	0.615	0.193	0.075	0.58	0.207	0.075
0.615	0	0.075	0.58	0	0.075	0.58	0.207	0.075

Продовження табл. А.1

0.58	0	0.075	0.58	0.207	0.075	0.33	0.145	0.075
0.58	0	0.075	0.33	0	0.075	0.33	0.145	0.075
0.33	0	0.075	0.33	0.145	0.075	0	0.145	0.075
0.33	0	0.075	0	0	0	0	0.145	0.075
-1.35	0	-0.075	-1.35	0.155	-0.075	-1.02	0.229	-0.075
-1.35	0	-0.075	-1.02	0	-0.075	-1.02	0.229	-0.075
-1.02	0	-0.075	-1.02	0.229	-0.075	-0.985	0.193	-0.075
-1.02	0	-0.075	-0.985	0	-0.075	-0.985	0.193	-0.075
-0.985	0	-0.075	-0.985	0.193	-0.075	-0.615	0.193	-0.075
-0.985	0	-0.075	-0.615	0	-0.075	-0.615	0.193	-0.075
-0.615	0	-0.075	-0.615	0.193	-0.075	-0.58	0.207	-0.075
-0.615	0	-0.075	-0.58	0	-0.075	-0.58	0.207	-0.075
-0.58	0	-0.075	-0.58	0.207	-0.075	-0.33	0.145	-0.075
-0.58	0	-0.075	-0.33	0	-0.075	-0.33	0.145	-0.075
-0.33	0	-0.075	-0.33	0.145	-0.075	0	0.145	-0.075
-0.33	0	-0.075	0	0	0	0	0.145	-0.075
1.35	0	-0.075	1.35	0.155	-0.075	1.02	0.229	-0.075
1.35	0	-0.075	1.02	0	-0.075	1.02	0.229	-0.075
1.02	0	-0.075	1.02	0.229	-0.075	0.985	0.193	-0.075
1.02	0	-0.075	0.985	0	-0.075	0.985	0.193	-0.075
0.985	0	-0.075	0.985	0.193	-0.075	0.615	0.193	-0.075
0.985	0	-0.075	0.615	0	-0.075	0.615	0.193	-0.075
0.615	0	-0.075	0.615	0.193	-0.075	0.58	0.207	-0.075
0.615	0	-0.075	0.58	0	-0.075	0.58	0.207	-0.075
0.58	0	-0.075	0.58	0.207	-0.075	0.33	0.145	-0.075
0.58	0	-0.075	0.33	0	-0.075	0.33	0.145	-0.075
0.33	0	-0.075	0.33	0.145	-0.075	0	0.145	-0.075
0.33	0	-0.075	0	0	0	0	0.145	-0.075
-1.35	0.155	0.075	-1.35	0.155	-0.075	-1.02	0.229	-0.075
-1.35	0.155	0.075	-1.02	0.229	0.075	-1.02	0.229	-0.075
-1.02	0.229	0.075	-1.02	0.229	-0.075	-0.985	0.193	-0.075
-1.02	0.229	0.075	-0.985	0.193	0.075	-0.985	0.193	-0.075
-0.985	0.193	0.075	-0.985	0.193	-0.075	-0.615	0.193	-0.075
-0.985	0.193	0.075	-0.615	0.193	0.075	-0.615	0.193	-0.075
-0.615	0.193	0.075	-0.615	0.193	-0.075	-0.58	0.207	-0.075
-0.615	0.193	0.075	-0.58	0.207	0.075	-0.58	0.207	-0.075
-0.58	0.207	0.075	-0.58	0.207	-0.075	-0.33	0.145	-0.075
-0.58	0.207	0.075	-0.33	0.145	0.075	-0.33	0.145	-0.075
-0.33	0.145	0.075	-0.33	0.145	-0.075	0	0.145	-0.075
-0.33	0.145	0.075	0	0.145	0.075	0	0.145	-0.075
1.35	0.155	0.075	1.35	0.155	-0.075	1.02	0.229	-0.075
1.35	0.155	0.075	1.02	0.229	0.075	1.02	0.229	-0.075
1.02	0.229	0.075	1.02	0.229	-0.075	0.985	0.193	-0.075
1.02	0.229	0.075	0.985	0.193	0.075	0.985	0.193	-0.075
0.985	0.193	0.075	0.985	0.193	-0.075	0.615	0.193	-0.075
0.985	0.193	0.075	0.615	0.193	0.075	0.615	0.193	-0.075
0.615	0.193	0.075	0.615	0.193	-0.075	0.58	0.207	-0.075

Закінчення табл. А.1

0.615	0.193	0.075	0.58	0.207	0.075	0.58	0.207	-0.075
0.58	0.207	0.075	0.58	0.207	-0.075	0.33	0.145	-0.075
0.58	0.207	0.075	0.33	0.145	0.075	0.33	0.145	-0.075
0.33	0.145	0.075	0.33	0.145	-0.075	0	0.145	-0.075
0.33	0.145	0.075	0	0.145	0.075	0	0.145	-0.075

ДОДАТОК Б
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГИНУ РЕЙКИ

Характеристики ділянки: рейки Р65, залізобетонні шпали, баласт щебеневий (модуль деформації 200 МПа) товщиною 0.5 м від підосви шпали, ґрунт з модулем деформації 25 МПа.

Таблиця Б.1 – Значення вертикальних прогинів рейки (в мкм) по осі центральної (9-ї шпали) за часовими кроками розрахунків (рухома сила, приклад для швидкості руху 160 км/год)

t	z
0.01146	85.050
0.01152	86.013
0.01158	86.975
0.01164	87.938
0.0117	88.900
0.01176	89.863
0.01182	90.913
0.01188	91.875
0.01194	92.838
0.012	93.888
0.01206	94.850
0.01212	95.900
0.01218	96.950
0.01224	98.000
0.0123	99.050
0.01236	100.100
0.01242	101.150
0.01248	102.200
0.01254	103.338
0.0126	104.388
0.01266	105.438
0.01272	106.488
0.01278	107.625
0.01284	108.500
0.0129	109.550
0.01296	110.950
0.01302	112.000
0.01308	113.138
0.01314	114.275
0.0132	115.325
0.01326	116.463
0.01332	117.600
0.01338	118.738
0.01344	119.875
0.0135	121.013
0.01356	122.150
0.01362	123.375

0.01368	124.513
0.01374	125.650
0.0138	126.875
0.01386	128.013
0.01392	129.238
0.01398	130.375
0.01404	131.600
0.0141	132.825
0.01416	133.963
0.01422	135.188
0.01428	136.413
0.01434	137.638
0.0144	138.863
0.01446	140.088
0.01452	141.313
0.01458	142.625
0.01464	143.850
0.0147	145.075
0.01476	146.388
0.01482	147.613
0.01488	148.925
0.01494	150.150
0.015	151.288
0.01506	152.425
0.01512	153.563
0.01518	154.788
0.01524	156.013
0.0153	157.238
0.01536	158.550
0.01542	159.775
0.01548	161.000
0.01554	162.225
0.0156	163.538
0.01566	164.763
0.01572	166.075
0.01578	167.388
0.01584	168.700
0.0159	169.925

0.01596	171.063
0.01602	172.200
0.01608	173.250
0.01614	174.388
0.0162	175.525
0.01626	176.750
0.01632	178.063
0.01638	179.463
0.01644	180.863
0.0165	182.263
0.01656	183.663
0.01662	185.063
0.01668	186.463
0.01674	187.775
0.0168	189.088
0.01686	190.488
0.01692	191.800
0.01698	193.200
0.01704	194.600
0.0171	196.000
0.01716	197.488
0.01722	198.888
0.01728	200.288
0.01734	201.688
0.0174	203.175
0.01746	204.663
0.01752	206.063
0.01758	207.550
0.01764	209.125
0.0177	210.613
0.01776	212.100
0.01782	213.588
0.01788	215.075
0.01794	216.563
0.018	218.138
0.01806	219.625
0.01812	221.200
0.01818	222.863

Продовження табл. Б.1

0.01824	224.438
0.0183	225.838
0.01836	227.413
0.01842	228.900
0.01848	230.475
0.01854	231.963
0.0186	233.625
0.01866	235.113
0.01872	236.775
0.01878	238.438
0.01884	240.100
0.0189	241.588
0.01896	243.250
0.01902	244.913
0.01908	246.663
0.01914	248.325
0.0192	249.988
0.01926	251.650
0.01932	253.313
0.01938	255.063
0.01944	256.813
0.0195	258.563
0.01956	260.225
0.01962	261.975
0.01968	263.725
0.01974	265.475
0.0198	267.313
0.01986	269.150
0.01992	270.900
0.01998	272.738
0.02004	274.488
0.0201	276.238
0.02016	278.075
0.02022	279.913
0.02028	281.750
0.02034	283.675
0.0204	285.600
0.02046	287.438
0.02052	289.275
0.02058	291.113
0.02064	292.950
0.0207	294.875
0.02076	296.800
0.02082	298.725
0.02088	300.650
0.02094	302.663
0.021	304.500

0.02106	306.425
0.02112	308.350
0.02118	310.275
0.02124	312.288
0.0213	314.388
0.02136	316.400
0.02142	318.325
0.02148	320.338
0.02154	322.263
0.0216	324.275
0.02166	326.200
0.02172	328.300
0.02178	330.313
0.02184	332.413
0.0219	334.513
0.02196	336.525
0.02202	338.625
0.02208	340.725
0.02214	342.825
0.0222	346.850
0.02226	348.863
0.02232	349.125
0.02238	352.975
0.02244	354.988
0.0225	357.088
0.02256	359.100
0.02262	361.200
0.02268	363.300
0.02274	365.400
0.0228	367.500
0.02286	369.600
0.02292	371.788
0.02298	373.888
0.02304	376.075
0.0231	378.175
0.02316	380.363
0.02322	382.550
0.02328	384.738
0.02334	386.925
0.0234	389.113
0.02346	391.300
0.02352	393.488
0.02358	395.763
0.02364	397.950
0.0237	400.225
0.02376	402.500
0.02382	404.688

0.02388	406.963
0.02394	409.238
0.024	411.600
0.02406	413.875
0.02412	416.150
0.02418	418.425
0.02424	420.788
0.0243	423.150
0.02436	425.425
0.02442	427.788
0.02448	430.063
0.02454	432.425
0.0246	434.788
0.02466	437.150
0.02472	439.513
0.02478	441.875
0.02484	444.325
0.0249	446.688
0.02496	449.050
0.02502	451.500
0.02508	453.688
0.02514	456.313
0.0252	458.763
0.02526	461.213
0.02532	463.663
0.02538	466.113
0.02544	468.563
0.0255	471.013
0.02556	473.463
0.02562	476.000
0.02568	478.450
0.02574	480.988
0.0258	483.438
0.02586	485.975
0.02592	488.513
0.02598	491.050
0.02604	493.588
0.0261	496.125
0.02616	498.663
0.02622	501.200
0.02628	503.825
0.02634	506.363
0.0264	508.988
0.02646	511.525
0.02652	514.150
0.02658	516.775
0.02664	519.400

Продовження табл. Б.1

0.0267	522.025
0.02676	524.650
0.02682	527.275
0.02688	529.900
0.02694	532.525
0.027	535.238
0.02706	537.863
0.02712	540.488
0.02718	543.200
0.02724	545.913
0.0273	548.625
0.02736	551.338
0.02742	554.050
0.02748	556.763
0.02754	559.475
0.0276	562.188
0.02766	564.988
0.02772	567.700
0.02778	570.500
0.02784	573.213
0.0279	576.013
0.02796	578.725
0.02802	581.525
0.02808	584.325
0.02814	587.125
0.0282	589.925
0.02826	592.725
0.02832	595.525
0.02838	598.413
0.02844	601.213
0.0285	604.013
0.02856	606.900
0.02862	609.700
0.02868	612.588
0.02874	615.475
0.0288	618.363
0.02886	621.163
0.02892	624.138
0.02898	627.025
0.02904	629.913
0.0291	632.800
0.02916	635.688
0.02922	638.663
0.02928	641.550
0.02934	644.525
0.0294	647.413
0.02946	650.388

0.02952	653.363
0.02958	656.338
0.02964	659.313
0.0297	662.288
0.02976	665.263
0.02982	668.238
0.02988	671.213
0.02994	674.275
0.03	677.250
0.03006	680.225
0.03012	683.288
0.03018	686.350
0.03024	689.325
0.0303	692.388
0.03036	695.450
0.03042	698.513
0.03048	701.575
0.03054	704.638
0.0306	707.700
0.03066	710.763
0.03072	713.913
0.03078	716.975
0.03084	720.038
0.0309	723.188
0.03096	726.338
0.03102	729.488
0.03108	732.638
0.03114	735.788
0.0312	738.850
0.03126	742.000
0.03132	745.238
0.03138	748.388
0.03144	751.538
0.0315	754.688
0.03156	757.925
0.03162	761.075
0.03168	764.313
0.03174	767.463
0.0318	770.700
0.03186	773.938
0.03192	777.088
0.03198	780.325
0.03204	783.563
0.0321	786.800
0.03216	790.038
0.03222	793.363
0.03228	796.600

0.03234	799.838
0.0324	803.163
0.03246	806.488
0.03252	809.725
0.03258	813.050
0.03264	816.375
0.0327	819.613
0.03276	822.938
0.03282	826.263
0.03288	829.588
0.03294	832.913
0.033	836.238
0.03306	839.563
0.03312	842.975
0.03318	846.300
0.03324	849.625
0.0333	853.038
0.03336	856.450
0.03342	859.775
0.03348	863.188
0.03354	866.600
0.0336	870.013
0.03366	873.425
0.03372	876.838
0.03378	880.250
0.03384	883.663
0.0339	887.075
0.03396	890.488
0.03402	893.900
0.03408	897.400
0.03414	900.813
0.0342	904.313
0.03426	907.725
0.03432	911.225
0.03438	914.725
0.03444	918.138
0.0345	921.638
0.03456	925.138
0.03462	928.638
0.03468	932.138
0.03474	935.638
0.0348	939.138
0.03486	942.638
0.03492	946.138
0.03498	949.725
0.03504	953.225
0.0351	956.725

Продовження табл. Б.1

0.03516	960.313
0.03522	963.813
0.03528	967.400
0.03534	970.988
0.0354	974.488
0.03546	978.075
0.03552	981.663
0.03558	985.250
0.03564	988.838
0.0357	992.425
0.03576	996.013
0.03582	999.600
0.03588	1003.188
0.03594	1006.863
0.036	1010.450
0.03606	1014.038
0.03612	1017.713
0.03618	1021.300
0.03624	1024.975
0.0363	1028.563
0.03636	1032.238
0.03642	1035.913
0.03648	1039.588
0.03654	1043.263
0.0366	1046.938
0.03666	1050.525
0.03672	1054.200
0.03678	1057.875
0.03684	1061.550
0.0369	1065.225
0.03696	1068.900
0.03702	1072.575
0.03708	1076.338
0.03714	1080.013
0.0372	1083.688
0.03726	1087.363
0.03732	1091.038
0.03738	1094.800
0.03744	1098.475
0.0375	1102.238
0.03756	1105.913
0.03762	1109.675
0.03768	1113.350
0.03774	1117.113
0.0378	1120.788
0.03786	1124.550
0.03792	1128.313

0.03798	1132.075
0.03804	1135.750
0.0381	1139.513
0.03816	1143.275
0.03822	1147.038
0.03828	1150.800
0.03834	1154.563
0.0384	1158.325
0.03846	1162.088
0.03852	1165.938
0.03858	1169.700
0.03864	1173.463
0.0387	1177.225
0.03876	1181.075
0.03882	1184.838
0.03888	1188.600
0.03894	1192.450
0.039	1196.213
0.03906	1200.063
0.03912	1203.825
0.03918	1207.675
0.03924	1211.438
0.0393	1215.288
0.03936	1219.138
0.03942	1222.900
0.03948	1226.750
0.03954	1230.600
0.0396	1234.450
0.03966	1238.213
0.03972	1242.063
0.03978	1245.913
0.03984	1249.763
0.0399	1253.613
0.03996	1257.463
0.04002	1261.313
0.04008	1265.163
0.04014	1269.013
0.0402	1272.863
0.04026	1276.713
0.04032	1280.563
0.04038	1284.500
0.04044	1288.350
0.0405	1292.288
0.04056	1296.138
0.04062	1299.988
0.04068	1303.925
0.04074	1307.775

0.0408	1311.713
0.04086	1315.563
0.04092	1319.500
0.04098	1323.350
0.04104	1327.288
0.0411	1331.138
0.04116	1335.075
0.04122	1338.925
0.04128	1342.863
0.04134	1346.713
0.0414	1350.650
0.04146	1354.500
0.04152	1358.438
0.04158	1362.375
0.04164	1366.225
0.0417	1370.163
0.04176	1374.013
0.04182	1377.950
0.04188	1381.888
0.04194	1385.738
0.042	1389.675
0.04206	1393.613
0.04212	1397.463
0.04218	1401.400
0.04224	1405.338
0.0423	1409.188
0.04236	1413.125
0.04242	1417.063
0.04248	1421.000
0.04254	1424.850
0.0426	1428.788
0.04266	1432.725
0.04272	1436.663
0.04278	1440.513
0.04284	1444.450
0.0429	1448.388
0.04296	1452.325
0.04302	1456.175
0.04308	1460.113
0.04314	1464.050
0.0432	1467.900
0.04326	1471.838
0.04332	1475.775
0.04338	1479.713
0.04344	1483.563
0.0435	1487.500
0.04356	1491.438

Продовження табл. Б.1

0.04362	1495.288
0.04368	1499.225
0.04374	1503.163
0.0438	1507.013
0.04386	1510.950
0.04392	1514.888
0.04398	1518.738
0.04404	1522.675
0.0441	1526.613
0.04416	1530.463
0.04422	1534.400
0.04428	1538.250
0.04434	1542.188
0.0444	1546.038
0.04446	1549.975
0.04452	1553.825
0.04458	1557.763
0.04464	1561.613
0.0447	1565.550
0.04476	1569.400
0.04482	1573.338
0.04488	1577.188
0.04494	1581.038
0.045	1584.975
0.04506	1588.825
0.04512	1592.675
0.04518	1596.525
0.04524	1600.463
0.0453	1604.313
0.04536	1608.163
0.04542	1612.013
0.04548	1615.863
0.04554	1619.713
0.0456	1623.563
0.04566	1627.413
0.04572	1631.263
0.04578	1635.113
0.04584	1638.963
0.0459	1642.813
0.04596	1646.663
0.04602	1650.513
0.04608	1654.363
0.04614	1658.213
0.0462	1661.975
0.04626	1665.825
0.04632	1669.675
0.04638	1673.438

0.04644	1677.288
0.0465	1681.138
0.04656	1684.900
0.04662	1688.750
0.04668	1692.513
0.04674	1696.275
0.0468	1700.038
0.04686	1703.888
0.04692	1707.650
0.04698	1711.413
0.04704	1715.175
0.0471	1718.938
0.04716	1722.700
0.04722	1726.463
0.04728	1730.225
0.04734	1733.988
0.0474	1737.663
0.04746	1741.425
0.04752	1745.188
0.04758	1748.863
0.04764	1752.625
0.0477	1756.300
0.04776	1759.975
0.04782	1763.650
0.04788	1767.325
0.04794	1771.088
0.048	1774.763
0.04806	1778.438
0.04812	1782.025
0.04818	1785.700
0.04824	1789.375
0.0483	1793.050
0.04836	1796.638
0.04842	1800.313
0.04848	1803.900
0.04854	1807.488
0.0486	1811.163
0.04866	1814.750
0.04872	1818.250
0.04878	1821.838
0.04884	1825.425
0.0489	1829.013
0.04896	1832.513
0.04902	1836.100
0.04908	1839.600
0.04914	1843.100
0.0492	1846.688

0.04926	1850.188
0.04932	1853.688
0.04938	1857.188
0.04944	1860.688
0.0495	1864.100
0.04956	1867.600
0.04962	1871.013
0.04968	1874.513
0.04974	1877.925
0.0498	1881.338
0.04986	1884.838
0.04992	1888.250
0.04998	1891.663
0.05004	1894.988
0.0501	1898.400
0.05016	1901.813
0.05022	1905.138
0.05028	1908.550
0.05034	1911.875
0.0504	1915.200
0.05046	1918.525
0.05052	1921.850
0.05058	1925.175
0.05064	1928.500
0.0507	1931.738
0.05076	1935.063
0.05082	1938.300
0.05088	1941.538
0.05094	1944.775
0.051	1948.013
0.05106	1951.250
0.05112	1954.488
0.05118	1957.725
0.05124	1960.875
0.0513	1964.113
0.05136	1967.263
0.05142	1970.413
0.05148	1973.563
0.05154	1976.713
0.0516	1979.863
0.05166	1982.925
0.05172	1986.075
0.05178	1989.138
0.05184	1992.288
0.0519	1995.350
0.05196	1998.413
0.05202	2001.475

Продовження табл. Б.1

0.05208	2004.450
0.05214	2007.513
0.0522	2010.488
0.05226	2013.550
0.05232	2016.525
0.05238	2019.500
0.05244	2022.475
0.0525	2025.450
0.05256	2028.338
0.05262	2031.313
0.05268	2034.200
0.05274	2037.175
0.0528	2040.063
0.05286	2042.950
0.05292	2045.838
0.05298	2048.638
0.05304	2051.525
0.0531	2054.325
0.05316	2057.125
0.05322	2060.013
0.05328	2062.725
0.05334	2065.525
0.0534	2068.325
0.05346	2071.125
0.05352	2073.838
0.05358	2076.550
0.05364	2079.263
0.0537	2081.975
0.05376	2084.688
0.05382	2087.400
0.05388	2090.025
0.05394	2092.650
0.054	2095.363
0.05406	2097.988
0.05412	2100.613
0.05418	2103.150
0.05424	2105.775
0.0543	2108.313
0.05436	2110.938
0.05442	2113.475
0.05448	2116.013
0.05454	2118.463
0.0546	2121.000
0.05466	2123.538
0.05472	2125.988
0.05478	2128.438
0.05484	2130.888

0.0549	2133.338
0.05496	2135.788
0.05502	2138.150
0.05508	2140.513
0.05514	2142.963
0.0552	2145.325
0.05526	2147.600
0.05532	2149.963
0.05538	2152.325
0.05544	2154.600
0.0555	2156.875
0.05556	2159.150
0.05562	2161.425
0.05568	2163.700
0.05574	2165.888
0.0558	2168.163
0.05586	2170.350
0.05592	2172.538
0.05598	2174.725
0.05604	2176.825
0.0561	2179.013
0.05616	2181.113
0.05622	2183.213
0.05628	2185.313
0.05634	2187.413
0.0564	2189.425
0.05646	2191.525
0.05652	2193.538
0.05658	2195.550
0.05664	2197.563
0.0567	2199.575
0.05676	2201.500
0.05682	2203.425
0.05688	2205.438
0.05694	2207.275
0.057	2209.200
0.05706	2211.125
0.05712	2212.963
0.05718	2214.800
0.05724	2216.638
0.0573	2218.475
0.05736	2220.313
0.05742	2222.063
0.05748	2223.900
0.05754	2225.650
0.0576	2227.313
0.05766	2229.063

0.05772	2230.813
0.05778	2232.475
0.05784	2234.138
0.0579	2235.800
0.05796	2237.463
0.05802	2239.038
0.05808	2240.613
0.05814	2242.188
0.0582	2243.763
0.05826	2245.338
0.05832	2246.825
0.05838	2248.400
0.05844	2249.888
0.0585	2251.375
0.05856	2252.775
0.05862	2254.263
0.05868	2255.663
0.05874	2257.063
0.0588	2258.463
0.05886	2259.863
0.05892	2261.175
0.05898	2262.488
0.05904	2263.800
0.0591	2265.113
0.05916	2266.338
0.05922	2267.650
0.05928	2268.875
0.05934	2270.100
0.0594	2271.325
0.05946	2272.463
0.05952	2273.600
0.05958	2274.738
0.05964	2275.875
0.0597	2277.013
0.05976	2278.063
0.05982	2279.113
0.05988	2280.163
0.05994	2281.213
0.06	2282.175
0.06006	2283.138
0.06012	2284.100
0.06018	2285.063
0.06024	2286.025
0.0603	2286.900
0.06036	2287.775
0.06042	2288.650
0.06048	2289.525

Продовження табл. Б.1

0.06054	2290.313
0.0606	2291.100
0.06066	2291.888
0.06072	2292.675
0.06078	2293.375
0.06084	2294.163
0.0609	2294.863
0.06096	2295.475
0.06102	2296.175
0.06108	2296.788
0.06114	2297.400
0.0612	2298.013
0.06126	2298.625
0.06132	2299.150
0.06138	2299.675
0.06144	2300.200
0.0615	2300.725
0.06156	2301.250
0.06162	2301.688
0.06168	2302.125
0.06174	2302.563
0.0618	2302.913
0.06186	2303.263
0.06192	2303.700
0.06198	2303.963
0.06204	2304.313
0.0621	2304.575
0.06216	2304.925
0.06222	2305.188
0.06228	2305.363
0.06234	2305.625
0.0624	2305.800
0.06246	2305.975
0.06252	2306.150
0.06258	2306.325
0.06264	2306.413
0.0627	2306.500
0.06276	2306.588
0.06282	2306.675
0.06288	2306.675
0.06294	2306.763
0.063	2306.763
0.06306	2306.763
0.06312	2306.675
0.06318	2306.675
0.06324	2306.588
0.0633	2306.500

0.06336	2306.325
0.06342	2306.238
0.06348	2306.063
0.06354	2305.888
0.0636	2305.713
0.06366	2305.538
0.06372	2305.275
0.06378	2305.100
0.06384	2304.838
0.0639	2304.488
0.06396	2304.225
0.06402	2303.875
0.06408	2303.613
0.06414	2303.263
0.0642	2302.825
0.06426	2302.475
0.06432	2302.038
0.06438	2301.600
0.06444	2301.163
0.0645	2300.725
0.06456	2300.288
0.06462	2299.763
0.06468	2299.238
0.06474	2298.713
0.0648	2298.188
0.06486	2297.575
0.06492	2297.050
0.06498	2296.438
0.06504	2295.825
0.0651	2295.125
0.06516	2294.513
0.06522	2293.813
0.06528	2293.113
0.06534	2292.413
0.0654	2291.713
0.06546	2291.013
0.06552	2290.225
0.06558	2289.438
0.06564	2288.650
0.0657	2287.863
0.06576	2286.988
0.06582	2286.200
0.06588	2285.325
0.06594	2284.450
0.066	2283.575
0.06606	2282.613
0.06612	2281.738

0.06618	2280.775
0.06624	2279.813
0.0663	2278.850
0.06636	2277.888
0.06642	2276.838
0.06648	2275.875
0.06654	2274.825
0.0666	2273.775
0.06666	2272.638
0.06672	2271.588
0.06678	2270.450
0.06684	2269.400
0.0669	2268.263
0.06696	2267.125
0.06702	2265.900
0.06708	2264.763
0.06714	2263.538
0.0672	2262.313
0.06726	2261.088
0.06732	2259.863
0.06738	2258.638
0.06744	2257.325
0.0675	2256.100
0.06756	2254.788
0.06762	2253.475
0.06768	2252.075
0.06774	2250.763
0.0678	2249.363
0.06786	2248.050
0.06792	2246.650
0.06798	2245.250
0.06804	2243.763
0.0681	2242.363
0.06816	2240.875
0.06822	2239.475
0.06828	2237.988
0.06834	2236.500
0.0684	2234.925
0.06846	2233.438
0.06852	2231.950
0.06858	2230.375
0.06864	2228.800
0.0687	2227.225
0.06876	2225.650
0.06882	2223.988
0.06888	2222.413
0.06894	2220.750

Продовження табл. Б.1

0.069	2219.088
0.06906	2217.425
0.06912	2215.763
0.06918	2214.100
0.06924	2212.350
0.0693	2210.600
0.06936	2208.938
0.06942	2207.188
0.06948	2205.350
0.06954	2203.600
0.0696	2201.850
0.06966	2200.013
0.06972	2198.175
0.06978	2196.425
0.06984	2194.500
0.0699	2192.663
0.06996	2190.825
0.07002	2188.900
0.07008	2187.063
0.07014	2185.138
0.0702	2183.213
0.07026	2181.288
0.07032	2179.363
0.07038	2177.350
0.07044	2175.425
0.0705	2173.413
0.07056	2171.400
0.07062	2169.388
0.07068	2167.375
0.07074	2165.363
0.0708	2163.263
0.07086	2161.250
0.07092	2159.150
0.07098	2157.050
0.07104	2154.950
0.0711	2152.850
0.07116	2150.750
0.07122	2148.563
0.07128	2146.463
0.07134	2144.275
0.0714	2142.088
0.07146	2139.900
0.07152	2137.713
0.07158	2135.525
0.07164	2133.250
0.0717	2131.063
0.07176	2128.788

0.07182	2126.513
0.07188	2124.238
0.07194	2121.963
0.072	2119.688
0.07206	2117.325
0.07212	2115.050
0.07218	2112.688
0.07224	2110.325
0.0723	2107.963
0.07236	2105.600
0.07242	2103.238
0.07248	2100.875
0.07254	2098.425
0.0726	2096.063
0.07266	2093.613
0.07272	2091.163
0.07278	2088.713
0.07284	2086.263
0.0729	2083.725
0.07296	2081.275
0.07302	2078.738
0.07308	2076.288
0.07314	2073.750
0.0732	2071.213
0.07326	2068.675
0.07332	2066.138
0.07338	2063.513
0.07344	2060.975
0.0735	2058.350
0.07356	2055.725
0.07362	2053.188
0.07368	2050.563
0.07374	2047.850
0.0738	2045.225
0.07386	2042.600
0.07392	2039.888
0.07398	2037.263
0.07404	2034.550
0.0741	2031.838
0.07416	2029.125
0.07422	2026.413
0.07428	2023.613
0.07434	2020.900
0.0744	2018.100
0.07446	2015.388
0.07452	2012.588
0.07458	2009.788

0.07464	2006.988
0.0747	2004.188
0.07476	2001.388
0.07482	1998.500
0.07488	1995.700
0.07494	1992.813
0.075	1989.925
0.07506	1987.038
0.07512	1984.150
0.07518	1981.263
0.07524	1978.375
0.0753	1975.488
0.07536	1972.513
0.07542	1969.625
0.07548	1966.650
0.07554	1963.675
0.0756	1960.700
0.07566	1957.725
0.07572	1954.750
0.07578	1951.775
0.07584	1948.713
0.0759	1945.738
0.07596	1942.675
0.07602	1939.613
0.07608	1936.550
0.07614	1933.575
0.0762	1930.513
0.07626	1927.363
0.07632	1924.300
0.07638	1921.238
0.07644	1918.088
0.0765	1915.025
0.07656	1911.875
0.07662	1908.725
0.07668	1905.575
0.07674	1902.425
0.0768	1899.275
0.07686	1896.125
0.07692	1892.975
0.07698	1889.738
0.07704	1886.588
0.0771	1883.350
0.07716	1880.200
0.07722	1876.963
0.07728	1873.725
0.07734	1870.488
0.0774	1867.250

Продовження табл. Б.1

0.07746	1864.013
0.07752	1860.775
0.07758	1857.450
0.07764	1854.213
0.0777	1850.888
0.07776	1847.650
0.07782	1844.325
0.07788	1841.000
0.07794	1837.763
0.078	1834.438
0.07806	1831.113
0.07812	1827.788
0.07818	1824.375
0.07824	1821.050
0.0783	1817.725
0.07836	1814.313
0.07842	1810.988
0.07848	1807.575
0.07854	1804.250
0.0786	1800.838
0.07866	1797.425
0.07872	1794.013
0.07878	1790.600
0.07884	1787.188
0.0789	1783.775
0.07896	1780.363
0.07902	1776.863
0.07908	1773.450
0.07914	1770.038
0.0792	1766.538
0.07926	1763.125
0.07932	1759.625
0.07938	1756.125
0.07944	1752.713
0.0795	1749.213
0.07956	1745.713
0.07962	1742.213
0.07968	1738.713
0.07974	1735.213
0.0798	1731.713
0.07986	1728.213
0.07992	1724.625
0.07998	1721.125
0.08004	1717.625
0.0801	1714.038
0.08016	1710.538
0.08022	1706.950

0.08028	1703.450
0.08034	1699.863
0.0804	1696.275
0.08046	1692.775
0.08052	1689.188
0.08058	1685.600
0.08064	1682.013
0.0807	1678.425
0.08076	1674.838
0.08082	1671.250
0.08088	1667.663
0.08094	1664.075
0.081	1660.400
0.08106	1656.813
0.08112	1653.225
0.08118	1649.550
0.08124	1645.963
0.0813	1642.375
0.08136	1638.700
0.08142	1635.113
0.08148	1631.438
0.08154	1627.763
0.0816	1624.175
0.08166	1620.500
0.08172	1616.825
0.08178	1613.238
0.08184	1609.563
0.0819	1605.888
0.08196	1602.213
0.08202	1598.538
0.08208	1594.863
0.08214	1591.188
0.0822	1587.513
0.08226	1583.838
0.08232	1580.163
0.08238	1576.488
0.08244	1572.813
0.0825	1569.138
0.08256	1565.463
0.08262	1561.700
0.08268	1558.025
0.08274	1554.350
0.0828	1550.588
0.08286	1546.913
0.08292	1543.238
0.08298	1539.475
0.08304	1535.800

0.0831	1532.125
0.08316	1528.363
0.08322	1524.688
0.08328	1520.925
0.08334	1517.250
0.0834	1513.488
0.08346	1509.813
0.08352	1506.050
0.08358	1502.288
0.08364	1498.613
0.0837	1494.850
0.08376	1491.175
0.08382	1487.413
0.08388	1483.650
0.08394	1479.975
0.084	1476.213
0.08406	1472.450
0.08412	1468.775
0.08418	1465.013
0.08424	1461.250
0.0843	1457.488
0.08436	1453.813
0.08442	1450.050
0.08448	1446.288
0.08454	1442.525
0.0846	1438.763
0.08466	1435.088
0.08472	1431.325
0.08478	1427.563
0.08484	1423.800
0.0849	1420.038
0.08496	1416.363
0.08502	1412.600
0.08508	1408.838
0.08514	1405.075
0.0852	1401.313
0.08526	1397.638
0.08532	1393.875
0.08538	1390.113
0.08544	1386.350
0.0855	1382.588
0.08556	1378.825
0.08562	1375.150
0.08568	1371.388
0.08574	1367.625
0.0858	1363.863
0.08586	1360.100

Продовження табл. Б.1

0.08592	1356.425
0.08598	1352.663
0.08604	1348.900
0.0861	1345.138
0.08616	1341.375
0.08622	1337.700
0.08628	1333.938
0.08634	1330.175
0.0864	1326.413
0.08646	1322.738
0.08652	1318.975
0.08658	1315.213
0.08664	1311.538
0.0867	1307.775
0.08676	1304.013
0.08682	1300.338
0.08688	1296.575
0.08694	1292.813
0.087	1289.138
0.08706	1285.375
0.08712	1281.700
0.08718	1277.938
0.08724	1274.175
0.0873	1270.500
0.08736	1266.738
0.08742	1263.063
0.08748	1259.300
0.08754	1255.625
0.0876	1251.950
0.08766	1248.188
0.08772	1244.513
0.08778	1240.750
0.08784	1237.075
0.0879	1233.400
0.08796	1229.638
0.08802	1225.963
0.08808	1222.288
0.08814	1218.613
0.0882	1214.938
0.08826	1211.175
0.08832	1207.500
0.08838	1203.825
0.08844	1200.150
0.0885	1196.475
0.08856	1192.800
0.08862	1189.125
0.08868	1185.450

0.08874	1181.775
0.0888	1178.100
0.08886	1174.425
0.08892	1170.750
0.08898	1167.075
0.08904	1163.400
0.0891	1159.813
0.08916	1156.138
0.08922	1152.463
0.08928	1148.875
0.08934	1145.200
0.0894	1141.525
0.08946	1137.938
0.08952	1134.263
0.08958	1130.675
0.08964	1127.000
0.0897	1123.413
0.08976	1119.738
0.08982	1116.150
0.08988	1112.563
0.08994	1108.888
0.09	1105.300
0.09006	1101.713
0.09012	1098.125
0.09018	1094.450
0.09024	1090.863
0.0903	1087.275
0.09036	1083.688
0.09042	1080.100
0.09048	1076.513
0.09054	1072.925
0.0906	1069.425
0.09066	1065.838
0.09072	1062.250
0.09078	1058.663
0.09084	1055.075
0.0909	1051.575
0.09096	1047.988
0.09102	1044.488
0.09108	1040.900
0.09114	1037.400
0.0912	1033.813
0.09126	1030.313
0.09132	1026.725
0.09138	1023.225
0.09144	1019.725
0.0915	1016.225

0.09156	1012.725
0.09162	1009.138
0.09168	1005.638
0.09174	1002.138
0.0918	998.638
0.09186	995.225
0.09192	991.725
0.09198	988.225
0.09204	984.725
0.0921	981.225
0.09216	977.813
0.09222	974.313
0.09228	970.813
0.09234	967.400
0.0924	963.900
0.09246	960.488
0.09252	957.075
0.09258	953.575
0.09264	950.163
0.0927	946.750
0.09276	943.338
0.09282	939.925
0.09288	936.513
0.09294	933.100
0.093	929.688
0.09306	926.275
0.09312	922.863
0.09318	919.450
0.09324	916.125
0.0933	912.713
0.09336	909.300
0.09342	905.975
0.09348	902.563
0.09354	899.238
0.0936	895.825
0.09366	892.500
0.09372	889.175
0.09378	885.850
0.09384	882.525
0.0939	879.113
0.09396	875.788
0.09402	872.463
0.09408	869.225
0.09414	865.900
0.0942	862.575
0.09426	859.250
0.09432	855.925

Продовження табл. Б.1

0.09438	852.688
0.09444	849.363
0.0945	846.125
0.09456	842.800
0.09462	839.563
0.09468	836.325
0.09474	833.000
0.0948	829.763
0.09486	826.525
0.09492	823.288
0.09498	820.050
0.09504	816.813
0.0951	813.575
0.09516	810.338
0.09522	807.188
0.09528	803.950
0.09534	800.713
0.0954	797.563
0.09546	794.325
0.09552	791.175
0.09558	787.938
0.09564	784.788
0.0957	781.638
0.09576	778.488
0.09582	775.338
0.09588	772.188
0.09594	769.038
0.096	765.888
0.09606	762.738
0.09612	759.588
0.09618	756.438
0.09624	753.375
0.0963	750.225
0.09636	747.163
0.09642	744.013
0.09648	740.950
0.09654	737.888
0.0966	734.738
0.09666	731.675
0.09672	728.613
0.09678	725.550
0.09684	722.488
0.0969	719.425
0.09696	716.363
0.09702	713.388
0.09708	710.325
0.09714	707.263

0.0972	704.288
0.09726	701.225
0.09732	698.250
0.09738	695.188
0.09744	692.213
0.0975	689.238
0.09756	686.263
0.09762	683.288
0.09768	680.313
0.09774	677.338
0.0978	674.363
0.09786	671.388
0.09792	668.413
0.09798	665.525
0.09804	662.550
0.0981	659.663
0.09816	656.688
0.09822	653.800
0.09828	650.825
0.09834	647.938
0.0984	645.050
0.09846	642.163
0.09852	639.275
0.09858	636.388
0.09864	633.500
0.0987	630.613
0.09876	627.813
0.09882	624.925
0.09888	622.038
0.09894	619.238
0.099	616.350
0.09906	613.550
0.09912	610.750
0.09918	607.950
0.09924	605.063
0.0993	602.263
0.09936	599.463
0.09942	596.663
0.09948	593.863
0.09954	591.150
0.0996	588.350
0.09966	585.550
0.09972	582.838
0.09978	580.038
0.09984	577.325
0.0999	574.525
0.09996	571.813

0.10002	569.100
0.10008	566.388
0.10014	563.675
0.1002	560.963
0.10026	558.250
0.10032	555.538
0.10038	552.825
0.10044	550.200
0.1005	547.488
0.10056	544.775
0.10062	542.150
0.10068	539.525
0.10074	536.813
0.1008	534.188
0.10086	531.563
0.10092	528.938
0.10098	526.313
0.10104	523.688
0.1011	521.063
0.10116	518.263
0.10122	515.725
0.10128	513.188
0.10134	510.563
0.1014	508.025
0.10146	505.488
0.10152	502.950
0.10158	500.325
0.10164	497.788
0.1017	495.250
0.10176	492.713
0.10182	490.175
0.10188	487.638
0.10194	485.100
0.102	482.563
0.10206	480.113
0.10212	460.425
0.10218	458.150
0.10224	472.588
0.1023	453.775
0.10236	451.500
0.10242	449.313
0.10248	447.125
0.10254	444.850
0.1026	442.663
0.10266	440.475
0.10272	438.288
0.10278	436.013

0.10284	433.825
0.1029	431.638
0.10296	429.450
0.10302	427.263
0.10308	425.075
0.10314	422.888
0.1032	420.700
0.10326	418.513
0.10332	416.325
0.10338	414.138
0.10344	411.950
0.1035	409.763
0.10356	407.575
0.10362	405.475
0.10368	403.288
0.10374	401.100
0.1038	399.000
0.10386	396.813
0.10392	394.713
0.10398	392.525
0.10404	390.425
0.1041	388.238
0.10416	386.138
0.10422	384.038
0.10428	381.850
0.10434	379.750
0.1044	377.650
0.10446	375.550
0.10452	373.450
0.10458	371.350
0.10464	369.250
0.1047	367.150
0.10476	365.050
0.10482	362.950
0.10488	360.850
0.10494	358.838
0.105	356.738
0.10506	362.863
0.10512	352.625
0.10518	350.525
0.10524	348.513
0.1053	346.500
0.10536	344.400
0.10542	342.388
0.10548	340.375
0.10554	338.363
0.1056	336.350

0.10566	334.338
0.10572	332.325
0.10578	330.313
0.10584	328.300
0.1059	326.288
0.10596	324.275
0.10602	322.350
0.10608	320.338
0.10614	318.413
0.1062	316.400
0.10626	314.475
0.10632	312.463
0.10638	316.400
0.10644	308.613
0.1065	306.688
0.10656	304.675
0.10662	302.750
0.10668	300.825
0.10674	298.900
0.1068	297.063
0.10686	295.138
0.10692	293.213
0.10698	296.363
0.10704	289.450
0.1071	287.525
0.10716	285.688
0.10722	283.763
0.10728	281.925
0.10734	280.000
0.1074	278.163
0.10746	276.325
0.10752	274.488
0.10758	272.650
0.10764	270.813
0.1077	268.975
0.10776	267.138
0.10782	265.300
0.10788	263.463
0.10794	261.625
0.108	259.875
0.10806	258.038
0.10812	256.288
0.10818	254.450
0.10824	252.700
0.1083	250.863
0.10836	249.113
0.10842	247.363

Продовження табл. Б.1

0.10848	245.613
0.10854	243.775
0.1086	242.025
0.10866	240.275
0.10872	238.613
0.10878	236.863
0.10884	235.113
0.1089	233.363
0.10896	231.613
0.10902	229.950
0.10908	228.200
0.10914	226.538
0.1092	224.788
0.10926	223.125
0.10932	221.463
0.10938	219.800
0.10944	218.050
0.1095	216.388
0.10956	214.725
0.10962	213.063
0.10968	211.400
0.10974	209.825
0.1098	208.163
0.10986	206.500
0.10992	204.838
0.10998	203.263
0.11004	201.600
0.1101	200.025
0.11016	198.363
0.11022	196.788
0.11028	195.213
0.11034	193.550
0.1104	191.975
0.11046	190.400
0.11052	188.825
0.11058	187.250
0.11064	185.675
0.1107	184.100
0.11076	182.613
0.11082	181.038
0.11088	179.463
0.11094	177.975
0.111	176.400
0.11106	174.913
0.11112	173.338
0.11118	171.850
0.11124	170.275

Продовження табл. Б.1

0.1113	168.788
0.11136	167.300
0.11142	165.813
0.11148	164.325
0.11154	162.838
0.1116	161.350
0.11166	159.863
0.11172	158.375
0.11178	156.975
0.11184	155.488
0.1119	154.000
0.11196	152.600
0.11202	150.238
0.11208	149.713
0.11214	148.225
0.1122	146.825
0.11226	145.425
0.11232	143.938
0.11238	142.538
0.11244	141.138
0.1125	139.738
0.11256	138.338
0.11262	136.850
0.11268	135.538
0.11274	134.138
0.1128	132.825
0.11286	131.425
0.11292	130.113
0.11298	128.713
0.11304	127.400
0.1131	126.000
0.11316	124.688
0.11322	101.675
0.11328	100.713
0.11334	120.663
0.1134	119.350
0.11346	118.038
0.11352	116.725
0.11358	95.813
0.11364	114.100
0.1137	93.800
0.11376	92.838
0.11382	91.788
0.11388	108.938
0.11394	89.863
0.114	88.813
0.11406	87.850

0.11412	103.863
0.11418	85.838
0.11424	84.875
0.1143	83.825
0.11436	82.863
0.11442	81.900
0.11448	80.850
0.11454	79.888
0.1146	78.925
0.11466	77.875
0.11472	76.913
0.11478	75.950
0.11484	74.900
0.1149	73.938
0.11496	72.975
0.11502	72.013
0.11508	70.963
0.11514	70.000
0.1152	69.038
0.11526	68.075
0.11532	67.113
0.11538	66.150
0.11544	65.100
0.1155	64.138
0.11556	63.175
0.11562	62.213
0.11568	61.250
0.11574	60.288
0.1158	59.325
0.11586	58.363
0.11592	57.400
0.11598	56.525
0.11604	55.563
0.1161	54.600
0.11616	53.638
0.11622	52.675
0.11628	51.713
0.11634	50.838
0.1164	49.875
0.11646	48.913
0.11652	48.038
0.11658	47.075
0.11664	46.200
0.1167	45.238
0.11676	44.363
0.11682	43.400
0.11688	42.525

0.11694	41.563
0.117	40.688
0.11706	39.813
0.11712	47.075
0.11718	46.025
0.11724	37.100
0.1173	36.225
0.11736	35.350
0.11742	34.475
0.11748	33.600
0.11754	32.725
0.1176	31.850
0.11766	30.975
0.11772	30.100
0.11778	29.225
0.11784	28.350
0.1179	27.563
0.11796	26.688
0.11802	25.813
0.11808	25.025
0.11814	24.150
0.1182	23.275
0.11826	22.488
0.11832	21.613
0.11838	20.825
0.11844	19.950
0.1185	24.938
0.11856	24.063
0.11862	17.500
0.11868	16.713
0.11874	15.925
0.1188	15.050
0.11886	14.263
0.11892	13.475
0.11898	12.688
0.11904	11.900
0.1191	11.113
0.11916	15.225
0.11922	14.350
0.11928	8.750
0.11934	7.963
0.1194	7.175
0.11946	6.475
0.11952	5.688
0.11958	4.900
0.11964	4.113
0.1197	3.413

Продовження табл. Б.1

0.11976	2.625
0.11982	1.925
0.11988	1.138
0.11994	0.438
0.12	-0.350
0.12006	-1.050
0.12012	-1.838
0.12018	-2.538
0.12024	-3.238
0.1203	-3.938
0.12036	-4.725
0.12042	-5.425
0.12048	-6.125
0.12054	-6.825
0.1206	-7.525
0.12066	-8.225
0.12072	-8.925
0.12078	-9.625
0.12084	-10.325
0.1209	-11.025
0.12096	-11.638
0.12102	-12.338
0.12108	-13.038
0.12114	-13.738
0.1212	-14.350
0.12126	-15.050
0.12132	-15.663
0.12138	-16.363
0.12144	-16.975
0.1215	-17.675
0.12156	-18.288
0.12162	-18.988
0.12168	-19.600
0.12174	-20.213
0.1218	-20.913
0.12186	-21.525
0.12192	-22.138
0.12198	-22.750
0.12204	-23.363
0.1221	-23.975
0.12216	-24.588
0.12222	-25.200
0.12228	-25.813
0.12234	-26.425
0.1224	-27.038
0.12246	-27.650
0.12252	-28.263

0.12258	-28.788
0.12264	-29.400
0.1227	-30.013
0.12276	-30.625
0.12282	-31.150
0.12288	-31.763
0.12294	-32.288
0.123	-32.900
0.12306	-33.425
0.12312	-34.038
0.12318	-34.563
0.12324	-35.088
0.1233	-35.700
0.12336	-36.225
0.12342	-36.750
0.12348	-37.275
0.12354	-37.888
0.1236	-38.413
0.12366	-38.938
0.12372	-39.463
0.12378	-39.988
0.12384	-40.513
0.1239	-41.038
0.12396	-41.563
0.12402	-42.088
0.12408	-42.525
0.12414	-43.050
0.1242	-43.575
0.12426	-44.100
0.12432	-44.538
0.12438	-45.063
0.12444	-45.588
0.1245	-46.025
0.12456	-46.550
0.12462	-46.988
0.12468	-47.513
0.12474	-47.950
0.1248	-48.475
0.12486	-48.913
0.12492	-49.438
0.12498	-49.875
0.12504	-50.313
0.1251	-50.750
0.12516	-51.275
0.12522	-51.713
0.12528	-52.150
0.12534	-52.588

0.1254	-53.200
0.12546	-53.638
0.12552	-53.988
0.12558	-54.425
0.12564	-54.863
0.1257	-55.213
0.12576	-55.650
0.12582	-56.088
0.12588	-56.525
0.12594	-56.875
0.126	-57.313
0.12606	-57.750
0.12612	-58.100
0.12618	-58.538
0.12624	-58.975
0.1263	-59.325
0.12636	-76.913
0.12642	-77.000
0.12648	-60.550
0.12654	-77.263
0.1266	-77.438
0.12666	-77.525
0.12672	-77.700
0.12678	-77.788
0.12684	-77.963
0.1269	-78.050
0.12696	-78.225
0.12702	-78.400
0.12708	-78.488
0.12714	-78.663
0.1272	-78.838
0.12726	-78.925
0.12732	-79.100
0.12738	-79.275
0.12744	-79.363
0.1275	-79.538
0.12756	-79.713
0.12762	-79.888
0.12768	-79.975
0.12774	-80.150
0.1278	-80.325
0.12786	-80.500
0.12792	-80.588
0.12798	-80.763
0.12804	-80.938
0.1281	-81.113
0.12816	-81.200

Продовження табл. Б.1

0.12822	-81.375
0.12828	-81.550
0.12834	-81.725
0.1284	-81.813
0.12846	-81.988
0.12852	-82.163
0.12858	-82.338
0.12864	-82.513
0.1287	-82.600
0.12876	-82.775
0.12882	-82.950
0.12888	-83.125
0.12894	-83.213
0.129	-83.388
0.12906	-83.563
0.12912	-83.650
0.12918	-83.825
0.12924	-84.000
0.1293	-75.950
0.12936	-84.263
0.12942	-84.438
0.12948	-84.613
0.12954	-84.700
0.1296	-84.875
0.12966	-84.963
0.12972	-85.138
0.12978	-85.313
0.12984	-85.400
0.1299	-85.575
0.12996	-85.663
0.13002	-85.838
0.13008	-86.013
0.13014	-86.100
0.1302	-86.275
0.13026	-86.363
0.13032	-86.538
0.13038	-86.625
0.13044	-86.800
0.1305	-86.888
0.13056	-87.063
0.13062	-81.288
0.13068	-87.325
0.13074	-87.413
0.1308	-87.500
0.13086	-87.675
0.13092	-87.763
0.13098	-87.938

0.13104	-88.025
0.1311	-88.113
0.13116	-88.288
0.13122	-83.300
0.13128	-88.463
0.13134	-88.550
0.1314	-88.725
0.13146	-88.813
0.13152	-88.900
0.13158	-88.988
0.13164	-89.163
0.1317	-89.250
0.13176	-89.338
0.13182	-89.425
0.13188	-89.513
0.13194	-89.688
0.132	-89.775
0.13206	-89.863
0.13212	-89.950
0.13218	-90.038
0.13224	-90.125
0.1323	-90.213
0.13236	-90.300
0.13242	-90.388
0.13248	-90.475
0.13254	-90.563
0.1326	-90.650
0.13266	-90.738
0.13272	-90.825
0.13278	-90.913
0.13284	-91.000
0.1329	-91.088
0.13296	-91.175
0.13302	-91.263
0.13308	-91.263
0.13314	-91.350
0.1332	-91.438
0.13326	-91.525
0.13332	-91.613
0.13338	-91.700
0.13344	-91.700
0.1335	-91.788
0.13356	-91.875
0.13362	-91.963
0.13368	-91.963
0.13374	-92.050
0.1338	-92.138

0.13386	-92.138
0.13392	-92.225
0.13398	-92.313
0.13404	-92.313
0.1341	-92.400
0.13416	-92.400
0.13422	-92.488
0.13428	-92.575
0.13434	-92.575
0.1344	-92.663
0.13446	-92.663
0.13452	-92.750
0.13458	-92.750
0.13464	-92.838
0.1347	-92.838
0.13476	-92.925
0.13482	-92.925
0.13488	-93.013
0.13494	-93.013
0.135	-93.013
0.13506	-93.100
0.13512	-93.100
0.13518	-93.100
0.13524	-93.188
0.1353	-93.188
0.13536	-93.188
0.13542	-93.275
0.13548	-93.275
0.13554	-93.275
0.1356	-93.363
0.13566	-93.363
0.13572	-93.363
0.13578	-93.363
0.13584	-93.363
0.1359	-93.450
0.13596	-93.450
0.13602	-93.450
0.13608	-93.450
0.13614	-93.450
0.1362	-93.450
0.13626	-93.450
0.13632	-93.450
0.13638	-93.538
0.13644	-93.538
0.1365	-93.538
0.13656	-93.538
0.13662	-93.538

Закінчення табл. Б.1

0.13668	-93.538
0.13674	-93.538
0.1368	-93.538
0.13686	-93.538
0.13692	-93.538
0.13698	-93.538
0.13704	-93.538
0.1371	-93.538
0.13716	-93.450
0.13722	-93.450
0.13728	-93.450
0.13734	-93.450
0.1374	-93.450
0.13746	-93.450
0.13752	-93.450
0.13758	-93.450
0.13764	-93.363
0.1377	-93.363
0.13776	-93.363
0.13782	-93.363
0.13788	-93.275
0.13794	-93.275
0.138	-93.275
0.13806	-93.275
0.13812	-93.188
0.13818	-93.188
0.13824	-93.188
0.1383	-93.100
0.13836	-93.100
0.13842	-93.100
0.13848	-93.013
0.13854	-93.013
0.1386	-93.013
0.13866	-92.925
0.13872	-92.925
0.13878	-92.838
0.13884	-92.838
0.1389	-92.838
0.13896	-92.750
0.13902	-92.750
0.13908	-92.663
0.13914	-92.663
0.1392	-92.575
0.13926	-92.575
0.13932	-92.488
0.13938	-92.488
0.13944	-92.400

0.1395	-92.400
0.13956	-92.313
0.13962	-92.313
0.13968	-92.225
0.13974	-92.138
0.1398	-92.138
0.13986	-92.050
0.13992	-92.050
0.13998	-91.963
0.14004	-91.875
0.1401	-91.875
0.14016	-91.788
0.14022	-91.700
0.14028	-91.700
0.14034	-91.613
0.1404	-91.525
0.14046	-91.525
0.14052	-91.438
0.14058	-91.350
0.14064	-91.263
0.1407	-91.263
0.14076	-91.175
0.14082	-91.088
0.14088	-91.000
0.14094	-91.000
0.141	-90.913
0.14106	-90.825
0.14112	-90.738
0.14118	-90.650
0.14124	-90.650
0.1413	-90.563
0.14136	-90.475
0.14142	-90.388
0.14148	-90.300
0.14154	-90.213
0.1416	-90.125
0.14166	-90.038
0.14172	-90.038
0.14178	-89.950
0.14184	-89.863
0.1419	-89.775
0.14196	-89.688
0.14202	-89.600
0.14208	-89.513
0.14214	-89.425
0.1422	-89.338
0.14226	-89.250

0.14232	-89.163
0.14238	-89.075
0.14244	-88.988
0.1425	-88.900
0.14256	-88.813
0.14262	-88.725
0.14268	-88.638
0.14274	-88.550
0.1428	-88.463
0.14286	-88.375
0.14292	-88.288
0.14298	-88.200
0.14304	-88.113
0.1431	-88.025
0.14316	-87.850
0.14322	-87.763
0.14328	-87.675
0.14334	-87.588
0.1434	-87.500
0.14346	-87.413
0.14352	-87.325
0.14358	-87.238
0.14364	-87.063
0.1437	-86.975
0.14376	-86.888
0.14382	-86.800
0.14388	-86.713
0.14394	-86.538
0.144	-86.450
0.14406	-86.363
0.14412	-86.275
0.14418	-86.100
0.14424	-86.013
0.1443	-85.925

ДОДАТОК В
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКОГО
ПОЇЗДА «TALGO»

Таблиця В.1 – Значення вертикальної сили від колеса на рейку, кН

Показники	Швидкість руху, км/год					
	10	40	80	120	160	200
Локомотив KZ4A ($P_{ст}=105,5$ кН)						
$P_{сер}$	104.74	103.83	102.10	107.84	104.75	107.94
S	8.776	10.726	11.456	16.265	17.280	26.826
$P_{розр}$	126.68	130.64	130.74	148.50	147.95	175.00
вагон ($P_{ст}=85$ кН)						
$P_{сер}$	94.04	91.85	91.24	93.07	90.42	92.70
S	9.654	11.564	10.562	12.827	13.496	16.415
$P_{розр}$	118.17	120.77	117.65	125.14	124.16	133.74

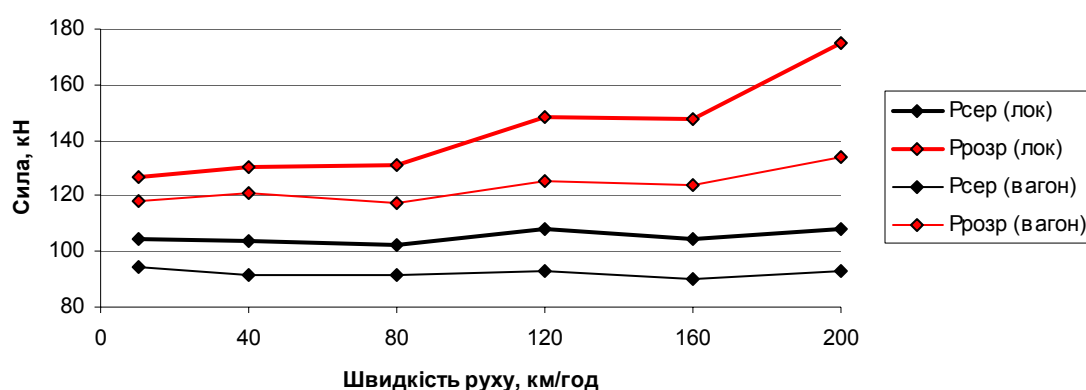


Рис. В.1 Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для локомотива KZ4A і пасажирського вагону

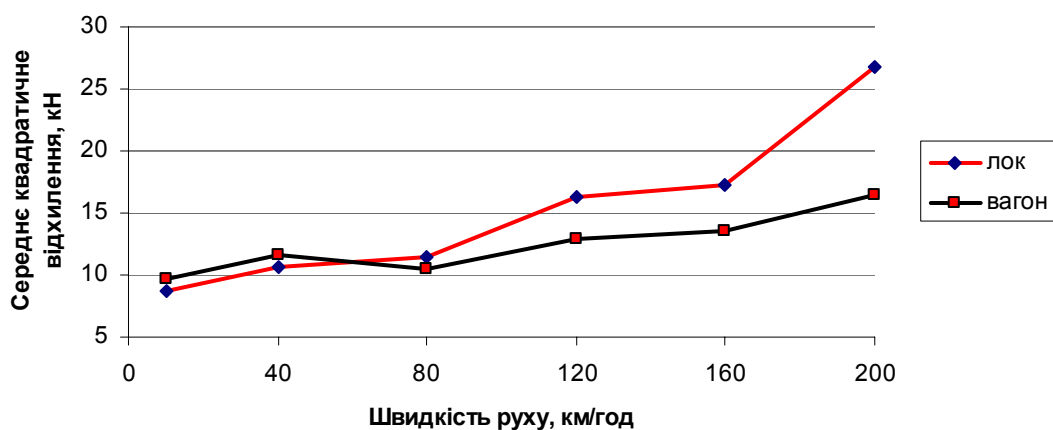


Рис. В.2 Залежність середньоквадратичного відхилення вертикальної сили від швидкості руху для локомотива KZ4A і пасажирського вагону

Вертикальна сила розраховувалась відносно полусуми кромочних напружень в підшві рейки за формулою

$$P = \frac{4kW\sigma_n}{10f},$$

де $U=40$ МПа; $I=3548$ см⁴; $W=436$ см³; $k=0.01076$ см⁻¹; $f=1$.

Таблиця В.2 – Матриця спостережень для факторного диверсійного аналізу оцінки впливу номера вісі для швидкості руху **200** км/год

Номер вимірювання	Номера осей пасажирських вагонів							
	7	8	9	10	19	20	21	22
1	19.91	26.98	25.79	25	24.55	25.1	23.35	26.33
2	28.03	27.27	26.18	26.25	25.25	27.31	26.71	27.5
3	28.22	27.61	26.7	26.31	25.95	27.56	27.87	28.6
4	28.56	28.24	27.4	27.39	26.16	27.58	28.07	28.77
5	28.84	29.85	27.45	28.25	26.81	28.23	28.22	28.97
6	28.98	30.2	27.49	28.49	26.82	28.36	28.43	29.12
7	29.05	30.39	27.67	30.07	26.86	28.38	28.99	29.84
8	29.18	30.4	27.7	30.42	27.06	30.14	29.53	30.18
9	29.79	30.78	28.11	30.88	29.1	30.24	29.58	30.81
10	30.44	31.33	28.4	31.12	29.87	30.84	29.92	31.46
11	30.49	31.86	28.45	31.26	29.9	31.8	29.96	31.47
12	30.78	31.97	28.5	31.41	29.95	32.29	30.69	31.82
13	31.71	32.33	28.62	31.61	29.97	32.35	30.74	32
14	31.78	32.49	28.66	31.76	29.98	32.42	31.28	32.22
15	31.79	32.68	29.03	32.09	31.11	32.52	31.72	32.71
16	32.26	32.74	29.61	32.11	31.26	32.52	32.16	32.94
17	32.74	32.8	29.94	32.21	31.43	32.55	32.22	33.8
18	32.8	33.04	30.25	32.51	31.53	32.66	32.42	33.93
19	32.82	33.38	30.67	32.76	31.84	32.72	32.69	34.06
20	32.88	33.61	31.19	32.76	32.12	32.76	32.87	34.08
21	33.6	33.72	31.27	32.92	32.37	32.82	32.88	34.38
22	33.75	33.97	31.63	33.02	32.39	32.87	32.9	34.45
23	34.24	34.02	31.84	33.02	32.57	33.63	33.38	34.46
24	34.25	34.17	32.09	33.28	32.83	33.64	33.39	34.62
25	34.39	34.35	32.56	33.47	32.84	33.68	33.44	34.69
26	34.41	34.48	32.6	33.62	33.15	33.94	33.89	34.8
27	34.78	34.65	32.93	33.71	33.25	34.17	34.61	34.89
28	34.87	34.81	33.15	33.83	33.78	34.34	35.46	35.21
29	35.36	35.38	33.46	33.86	34.25	34.4	35.63	35.53
30	35.75	35.6	33.79	33.92	34.48	34.71	35.83	35.64
31	35.84	35.78	33.95	34.02	34.59	35.02	35.87	36.11
32	36.04	35.97	35.33	34.39	35.54	35.05	36.17	36.21
33	36.43	36.13	35.44	34.76	35.82	35.19	37.19	37.3
34	36.55	36.88	35.56	34.81	36.14	35.53	37.28	37.33
35	36.8	37.06	35.97	34.89	36.18	35.74	37.84	37.43

Закінчення табл. В.2

36	36.83	37.15	35.98	35.22	36.39	35.8	38.06	37.47
37	37.01	37.49	36.41	35.28	36.55	35.94	38.09	37.82
38	37.34	37.64	36.53	35.58	36.67	36.28	38.15	38.19
39	37.78	37.74	36.77	35.8	37.51	36.35	38.2	38.49
40	37.94	38.09	36.81	36.02	37.76	36.9	38.25	39.23
41	37.95	38.2	36.92	36.15	38.09	36.97	38.54	39.26
42	38.05	38.5	37.12	36.47	38.34	37.27	38.58	39.77
43	38.18	38.95	37.35	36.65	38.53	37.64	38.65	39.83
44	38.28	39.59	37.61	36.77	38.71	37.65	39.81	40.3
45	38.49	39.7	38.11	37.4	39.07	37.67	40.2	40.49
46	39.08	39.8	38.55	37.42	39.09	38.04	41	40.56
47	39.21	40.38	38.78	37.48	39.36	38.07	41.02	40.6
48	39.5	40.48	38.9	37.52	39.65	38.17	41.04	40.94
49	39.82	40.8	39.17	37.85	40.52	38.23	41.19	41.53
50	39.85	41.03	39.81	38.04	40.97	38.79	41.69	41.58
51	39.92	41.55	39.84	38.28	41.48	39.13	41.71	43.26
52	40.18	41.64	39.92	38.4	41.5	39.22	42.22	43.97
53	40.98	41.65	40.98	38.49	41.61	39.6	42.58	44.4
54	41.34	41.74	42.01	38.61	41.67	40.15	42.89	45.54
55	41.46	42.35	42.55	38.65	42.23	40.37	42.96	45.61
56	41.88	42.73	44.7	38.78	42.72	40.6	43.18	45.61
57	42.28	43.09	44.82	38.83	43.45	40.69	43.31	46.2
58	42.73	43.39	44.98	38.95	43.5	41.14	43.66	46.98
59	42.92	47.73	46.06	39.09	44.26	41.19	45.04	47.21
60	43.36	47.91	46.87	39.42	44.91	42.89	45.87	47.93
61	43.91	48.37	48.19	39.44	45.39	43.05	46.13	48.45
62	44.86	49.67	48.57	39.54	45.83	43.46	47.04	48.9
63	44.95	49.79	51.31	39.68	47.2	43.89	47.37	49.06
64	45.11	50.51	51.36	41.7	47.23	44.19	47.39	50.13
65	45.51	50.82	52.34	42.57	47.74	44.56	49.13	50.82
66	48.26	51.01	53.19	44.8	47.75	44.69	50.16	51.68
67	48.31	51.54	53.25	44.85	48.9	46.69	50.99	51.93
68	48.97	51.55	53.74	45.63	49.2	47.19	51.07	56.46
69	50.19	51.99	54.21	45.85	51.84	35.96	37.33	38.44
70	52.53	55.48	54.39	49.26	57.92	35.96	37.33	38.44
$\bar{x} =$ 37.040	37.044	38.242	36.964	35.466	36.875	35.964	37.329	38.439
$Q_{\phi} =$ 500.805	0.00001	1.445	0.006	2.477	0.027	1.159	0.083	1.956
$Q_{\text{зал}} =$ 23291.7	2592.2	3322.7	4532.5	1562.2	3530.7	1661.4	2862.6	3227.4
σ_{ϕ}	71.544							
$\sigma_{\text{зал}}$	42.195							
F	1.696				k1=7	k2=553	Fкр=2,03	

Таблиця В.3 – Матриця спостережень для факторного диверсійного аналізу
оцінки впливу місця перерізу рейки для швидкості руху **200** км/год

Номер вимірю- вання	Номери перерізу рейки							
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16
1	39.08	32.74	32.88	30.49	19.91	28.03	38.49	31.71
2	39.85	32.82	36.43	34.24	28.56	28.22	40.98	31.78
3	40.18	35.36	37.78	34.39	29.79	28.84	42.28	33.6
4	41.46	35.75	38.05	34.41	30.44	28.98	43.91	37.01
5	42.73	35.84	38.18	34.78	31.79	29.05	44.86	38.28
6	48.26	36.55	39.21	34.87	32.26	29.18	44.95	39.82
7	48.97	36.8	41.34	37.95	33.75	30.78	45.11	27.27
8	52.53	37.34	41.88	34.35	34.25	32.8	45.51	31.33
9	39.59	37.94	42.92	36.88	36.04	39.92	48.31	33.61
10	39.7	39.5	43.36	37.06	36.83	29.85	50.19	36.13
11	40.48	31.97	33.38	37.64	26.98	30.39	41.74	37.15
12	41.55	34.65	33.97	37.74	27.61	30.78	47.73	41.03
13	42.73	35.6	34.17	38.09	28.24	32.49	49.67	25.79
14	47.91	37.49	34.48	38.95	30.2	32.74	49.79	27.67
15	48.37	38.2	35.38	29.61	30.4	32.8	50.51	32.09
16	50.82	40.38	35.78	30.25	31.86	33.04	51.01	33.95
17	35.98	40.8	38.5	31.19	32.33	34.81	51.54	35.97
18	38.11	41.65	39.8	31.27	32.68	35.97	51.55	36.41
19	38.78	43.09	41.64	31.63	33.72	26.18	51.99	34.39
20	38.9	43.39	42.35	32.6	34.02	27.4	55.48	36.65
21	39.17	26.7	37.35	32.93	28.4	27.45	37.12	39.44
22	44.7	28.5	38.55	34.81	29.03	27.49	48.19	42.57
23	46.87	28.62	39.84	36.47	29.94	27.7	51.31	44.8
24	48.57	32.56	39.92	37.42	30.67	28.11	51.36	45.63
25	35.22	33.15	40.98	38.83	33.79	28.45	52.34	31.84
26	37.48	33.46	42.01	38.95	35.33	28.66	53.19	33.78
27	38.28	35.56	42.55	39.54	35.44	31.84	53.25	34.59
28	38.61	36.81	44.82	39.68	36.53	30.88	53.74	36.55
29	39.09	37.61	44.98	29.87	36.77	31.41	54.21	37.51
30	44.85	39.81	46.06	29.9	36.92	31.76	54.39	38.71
31	45.85	31.12	32.11	29.98	25	32.09	33.02	39.13
32	49.26	31.61	32.51	31.43	26.25	33.28	34.76	40.37
33	36.39	32.76	32.92	32.12	26.31	33.62	35.28	43.89
34	38.53	32.76	33.02	32.39	27.39	33.83	36.15	46.69
35	39.09	33.47	33.71	32.84	28.25	34.89	37.52	47.19
36	39.36	33.92	33.86	35.94	28.49	35.8	37.85	32.88
37	41.48	34.02	35.58	36.28	30.07	24.55	38.4	33.38
38	48.9	36.77	36.02	36.35	30.42	25.25	38.65	37.84
39	49.2	37.4	38.04	37.27	31.26	25.95	39.42	39.81
40	51.84	38.78	38.49	37.64	32.21	26.16	41.7	41.19
41	33.94	29.1	38.09	37.65	29.97	26.81	41.5	34.46

Продовження табл. В.3

42	34.4	29.95	39.07	38.79	31.26	26.82	41.61	35.64
43	35.05	32.37	40.52	29.53	31.53	26.86	42.23	39.26
44	35.19	32.57	40.97	29.58	33.15	27.06	43.45	41.58
45	38.07	32.83	41.67	30.69	33.25	31.11	44.91	43.26
46	43.05	34.48	42.72	31.28	34.25	28.38	45.39	
47	44.19	35.54	43.5	31.72	35.82	32.29	45.83	
48	44.56	36.14	44.26	32.69	36.67	32.35	47.23	
49	40.2	36.18	47.2	32.9	37.76	32.42	47.75	
50	41.04	38.34	47.74	37.33	39.65	32.52	57.92	
51	41.71	30.84	31.8	37.43	25.1	33.63	33.68	
52	43.31	32.72	32.55	37.82	27.31	33.64	35.02	
53	43.66	34.17	32.66	38.19	27.56	34.71	35.53	
54	50.16	38.23	32.76	38.49	27.58	35.74	36.9	
55	50.99	39.6	32.82	39.83	28.23	23.35	36.97	
56	51.07	40.6	34.34	40.3	28.36	26.71	37.67	
57	40.49	40.69	35.8		30.14	27.87	38.17	
58	40.94	42.89	38.04		30.24	28.07	39.22	
59	44.4	43.46	40.15		32.52	28.22	41.19	
60	45.54	44.69	41.14		32.87	28.43	41.02	
61	47.93	29.92	38.09		32.16	28.99	42.89	
62	48.9	30.74	38.15		33.39	29.96	42.96	
63	50.82	32.22	38.2		33.44	32.42	43.18	
64	56.46	32.87	38.25		33.89	28.97	45.04	
65		35.63	38.54		34.61	32	45.87	
66		35.83	41		35.46	32.22	47.04	
67		37.19	42.22		35.87	34.06	47.39	
68		37.28	42.58		36.17	34.08	49.13	
69		38.58	46.13		38.06	34.38	45.61	
70		41.69	47.37		38.65	34.89	45.61	
71		34.62	30.81		26.33	36.21	46.2	
72		34.8	31.46		27.5	37.3	47.21	
73		35.21	32.71		28.6		48.45	
74		35.53	32.94		28.77		49.06	
75		36.11	33.93		29.12		50.13	
76		39.77	34.45		29.84		51.68	
77		40.6	34.69		30.18		51.93	
78		41.53	37.47		31.47			
79		43.97	39.23		31.82			
80		46.98	40.56		33.8			
$\bar{x} =$ 37.040	43.044	36.121	38.267	34.879	31.531	30.748	44.935	43.044
$Q_{\phi} =$ 13093.4	2306.469	67.566	120.417	261.495	2428.262	2850.344	4799.421	2306.469
$Q_{\text{зал}} =$ 9856.382	1773.595	1366.625	1473.730	612.880	1076.694	809.275	2743.584	1773.595

σ_{ϕ}	2182.231							
$\sigma_{\text{зал}}$	17.823							
F	122.4							

Таблиця В.4 – Матриця спостережень для факторного диверсійного аналізу оцінки впливу номера вісі для швидкості руху **80** км/год

Номер вимірювання	Номера осей пасажирських вагонів							
	7	8	9	10	19	20	21	22
1	30.38	30.16	27.93	27.06	26.58	27.63	30.44	29.85
2	30.4	30.37	28.19	27.17	27.71	28.49	30.54	30.19
3	30.44	30.39	28.45	27.22	28.05	28.59	30.59	30.4
4	30.54	30.73	28.65	27.23	28.87	28.66	30.6	30.43
5	30.57	31.08	28.94	27.42	28.88	28.89	30.75	30.51
6	30.59	31.2	29.23	27.57	29.58	28.9	30.91	30.82
7	30.64	31.28	30.72	28.66	31.12	28.97	31.22	30.91
8	30.68	31.52	30.97	29.61	31.29	29.11	31.38	31.4
9	30.84	31.56	31.17	29.71	31.63	29.22	31.63	31.4
10	30.88	31.68	31.41	30.31	31.76	29.29	31.66	31.48
11	30.95	31.71	31.47	30.66	31.86	29.32	31.73	31.94
12	30.99	32.01	31.81	30.7	31.87	29.43	32.13	32.25
13	31.5	32.01	31.84	31	31.88	29.76	32.62	32.3
14	31.78	32.14	32.09	31.05	31.92	30.37	32.77	32.75
15	32.11	32.48	32.52	31.06	32.03	31.22	33.32	32.9
16	32.33	32.58	32.88	31.25	32.08	31.36	33.6	32.99
17	32.6	32.64	33.04	31.42	32.26	31.54	33.62	33.17
18	32.63	33.22	33.17	31.55	32.56	31.61	33.67	33.44
19	33.09	33.38	33.18	31.6	32.82	31.67	33.71	33.58
20	33.22	33.65	33.18	31.62	33.05	32.39	33.83	33.71
21	33.29	33.72	33.24	31.79	33.07	32.53	33.83	33.75
22	33.5	34.12	33.38	31.84	33.24	32.6	33.87	33.79
23	34.11	34.16	33.43	32.21	33.34	32.97	34.11	34.1
24	34.23	34.17	33.54	32.32	33.37	34.21	34.19	34.44
25	34.53	34.22	33.68	32.93	34.08	34.4	34.31	34.46
26	34.6	34.38	33.69	33.18	34.41	34.4	34.5	34.84
27	34.63	34.53	33.74	33.23	34.47	34.41	34.53	34.86
28	34.74	34.54	33.93	33.28	34.51	34.71	34.87	34.88
29	34.97	34.57	33.93	33.32	34.71	34.75	35.06	35.03
30	35.03	35.42	33.99	33.49	34.81	34.85	35.07	35.07
31	35.05	35.7	34.09	33.91	34.82	34.91	35.11	35.07
32	35.07	36.06	34.29	34.39	35.22	35	35.17	35.48
33	35.18	36.43	34.48	34.7	35.48	35.1	35.17	35.72
34	35.19	36.5	34.64	34.75	35.71	35.15	35.2	35.86
35	35.29	36.55	35.26	34.8	35.87	35.16	35.31	36.3
36	35.32	36.73	35.67	36.11	35.97	35.2	35.46	36.59

Продовження табл. В.4

37	35.35	36.78	35.95	36.67	36.1	35.31	35.46	36.63
38	35.47	37.18	36.16	36.8	36.1	35.46	35.5	36.94
39	35.5	37.32	36.2	37.47	36.19	35.8	35.68	37
40	35.56	37.43	36.36	37.47	36.56	35.8	35.76	37.24
41	35.61	37.43	36.4	37.71	36.57	35.93	35.77	37.55
42	35.67	37.47	36.6	37.75	36.57	36.17	35.96	37.64
43	35.69	37.47	36.7	37.8	37.14	36.17	36.17	37.84
44	35.81	37.51	36.73	37.8	37.18	36.28	36.19	37.85
45	35.96	37.66	36.8	37.85	37.21	36.32	36.21	37.85
46	36.22	37.87	37.05	37.92	37.36	36.32	36.22	37.89
47	36.32	38.18	37.22	37.95	37.46	36.45	36.5	37.9
48	36.4	38.29	37.24	38.07	37.56	36.47	36.52	37.99
49	36.66	38.36	37.34	38.12	37.56	36.64	36.73	38.01
50	36.68	38.37	37.36	38.16	37.62	36.72	36.74	38.14
51	36.75	38.45	37.7	38.51	37.66	36.74	36.92	38.57
52	36.79	38.48	37.84	38.52	37.67	36.74	36.96	38.9
53	36.89	38.58	37.86	38.53	37.71	37.09	37.03	38.96
54	36.97	38.72	37.94	38.6	37.73	37.52	37.06	38.98
55	37.26	39.04	38.05	38.64	37.74	37.64	37.07	39
56	37.52	39.14	38.23	38.79	37.88	37.69	37.11	39.2
57	37.86	39.19	38.44	38.84	37.89	37.69	37.23	39.25
58	38.22	39.35	38.62	38.84	37.92	37.79	37.81	39.28
59	38.27	39.38	38.67	39.18	38.07	38.27	38.06	39.5
60	38.31	39.38	38.84	39.19	38.12	38.76	38.06	39.51
61	39.12	39.39	38.88	39.34	38.52	39.26	38.35	39.66
62	39.47	39.4	39.22	39.39	38.57	39.63	38.89	39.86
63	40.05	39.54	39.25	39.86	38.6	39.66	39.26	40.01
64	40.61	39.67	39.37	40.1	38.79	39.78	39.4	40.13
65	41.06	39.7	39.76	40.24	38.91	40.22	40.95	40.17
66	41.67	39.72	39.86	40.59	39.2	41	41.22	40.23
67	41.7	39.75	39.97	40.74	39.56	41.17	41.35	40.23
68	41.88	39.85	40.12	40.92	39.61	41.52	41.39	40.46
69	41.88	40.26	40.33	41.23	39.66	41.86	41.44	40.51
70	41.92	40.31	41.17	41.59	41.83	41.87	41.74	40.58
71	42.32	40.72	42.17	42.68	43.04	42.11	41.95	40.61
72	42.94	40.72	42.17	42.93	43.37	42.11	41.98	40.93
73	43.09	40.81	43.64	43.18	43.71	42.17	42.18	40.95
74	43.14	41.08	43.77	43.38	43.77	42.26	42.22	40.99
75	43.24	41.09	43.78	43.49	44.28	42.55	42.29	41.51
76	43.44	41.59	43.84	43.75	44.56	42.55	42.33	41.71
77	43.65	42.38	44.1	44.67	44.57	42.56	42.59	41.74
78	44.1	42.48	44.32	44.73	44.73	42.61	43.13	42.1
79	44.16	42.64	44.47	44.77	44.78	43.16	43.29	42.39
80	44.16	42.74	44.61	44.88	44.98	43.46	43.4	42.55
81	44.71	43.09	44.93	45.33	45.02	43.51	43.44	43.46

Закінчення табл. В.4

82	36.39	43.89	45.11	45.45	45.13	43.56	44.32	43.6
$\bar{x} =$ 36.456	36.394	36.774	36.426	36.324	36.483	35.940	36.492	36.813
$Q_{\phi} =$ 42.498	0.004	0.101	0.001	0.017	0.001	0.266	0.001	0.128
$Q_{\text{зал}} =$ 11604.95	1382.63	1062.875	1576.638	2083.786	1624.964	1647.522	1138.524	1088.008
σ_{ϕ}	6.071							
$\sigma_{\text{зал}}$	20.503							
F	0.296				k1=7	k2=649	F _{кр} =2,02	

Таблиця В.5 – Матриця спостережень для факторного диверсійного аналізу оцінки впливу місця перерізу рейки для швидкості руху **80** км/год

	Номери перерізу рейки						
	1-2	3-4	5-6	9-10	11-12	13-14	15-16
1	35.69	30.95	30.4	30.88	30.38	34.11	35.29
2	36.4	32.11	30.44	31.78	30.59	34.74	36.66
3	36.75	32.63	30.54	32.33	30.68	34.97	36.68
4	36.79	33.09	30.57	32.6	30.84	35.03	36.89
5	37.26	33.29	30.64	33.22	31.5	35.19	39.12
6	37.86	37.52	30.99	33.5	35.32	36.22	39.47
7	40.05	38.22	34.23	34.53	35.56	41.7	43.09
8	41.06	38.27	34.63	34.6	35.61	41.88	43.65
9	41.67	38.31	35.07	35.05	35.67	42.32	44.1
10	41.88	40.61	35.18	35.35	35.81	43.14	44.16
11	41.92	37.43	35.47	35.5	35.96	43.24	44.16
12	42.94	37.51	36.32	36.97	30.16	43.44	44.71
13	36.06	37.66	30.37	30.73	30.39	39.04	36.43
14	37.47	38.18	31.52	32.14	31.08	39.7	36.73
15	37.87	38.36	31.56	32.48	31.2	39.72	36.78
16	38.48	38.37	31.71	32.58	31.28	39.75	37.18
17	38.58	39.35	32.01	33.38	31.68	40.26	37.32
18	39.38	39.38	32.01	34.54	32.64	40.31	37.47
19	42.38	39.67	34.12	35.7	33.22	40.72	38.45
20	42.48	39.85	34.22	36.5	33.65	40.72	38.72
21	42.64	31.84	34.38	36.55	33.72	40.81	39.14
22	42.74	32.88	34.53	37.43	34.16	41.08	39.19
23	43.09	33.38	34.57	38.29	34.17	41.09	39.4
24	43.89	33.54	35.42	39.39	27.93	41.59	39.54
25	36.2	33.68	30.72	32.09	28.19	36.7	33.04
26	36.8	38.05	30.97	33.43	28.45	36.73	33.17
27	37.05	39.25	31.17	33.93	28.65	37.22	33.93
28	37.86	39.37	31.41	34.48	28.94	37.36	33.99
29	38.62	40.12	31.47	34.64	29.23	37.94	34.09
30	38.88	41.17	31.81	35.26	32.52	38.84	34.29

Продовження табл. В.5

31	42.17	31.42	36.4	35.67	33.18	43.77	38.67
32	42.17	31.55	36.6	35.95	33.18	43.78	39.22
33	43.64	31.84	37.34	36.16	33.24	44.47	39.76
34	43.84	32.21	37.84	36.36	33.69	44.61	39.86
35	44.1	32.32	38.23	37.24	33.74	44.93	39.97
36	44.32	36.67	38.44	37.7	27.06	45.11	40.33
37	36.11	37.8	29.61	28.66	27.17	37.47	31.79
38	37.47	38.52	30.31	29.71	27.22	37.75	32.93
39	37.92	38.6	30.7	30.66	27.23	38.07	33.18
40	38.12	39.18	31.05	31	27.42	38.51	33.23
41	38.53	31.29	31.25	31.06	27.57	38.79	33.32
42	38.64	32.03	31.6	31.62	33.28	40.1	33.49
43	42.68	32.82	36.8	38.84	33.91	43.75	38.84
44	42.93	33.07	37.71	39.34	34.39	44.67	39.19
45	43.18	33.34	37.8	39.39	34.7	44.73	39.86
46	43.38	36.19	37.85	40.24	34.75	44.77	40.59
47	43.49	36.57	37.95	40.92	34.8	44.88	40.74
48	45.45	37.73	38.16	41.59	26.58	45.33	41.23
49	38.79	37.89	31.76	34.08	27.71	36.57	33.37
50	39.2	38.12	31.86	34.41	28.05	37.14	34.47
51	39.56	31.54	32.26	34.71	28.87	37.74	34.51
52	39.61	32.39	32.56	35.22	28.88	38.07	34.81
53	39.66	32.53	33.05	35.48	29.58	38.57	34.82
54	41.83	32.6	33.24	35.87	31.12	38.91	37.56
55	43.04	32.97	35.71	35.97	31.63	43.71	37.56
56	43.37	38.27	36.1	37.21	31.87	43.77	37.66
57	44.56	38.76	36.1	37.36	31.88	44.28	37.67
58	44.78	39.26	36.56	37.46	31.92	44.57	37.71
59	45.02	39.78	37.18	37.62	32.08	44.73	38.52
60	45.13	40.22	37.88	37.92	28.66	44.98	38.6
61	34.21	33.6	27.63	28.97	28.9	35.31	34.4
62	34.41	34.31	28.49	29.32	29.11	36.17	34.4
63	34.91	35.2	28.59	31.22	29.22	36.28	34.75
64	36.17	35.31	28.89	31.36	29.43	36.45	35
65	36.32	35.76	29.29	31.61	29.76	36.64	35.8
66	36.72	35.96	30.37	31.67	34.85	36.74	36.32
67	42.11	36.22	34.71	37.52	35.46	39.66	41.86
68	42.11	36.92	35.1	37.64	35.93	41	41.87
69	42.26	36.96	35.15	37.69	36.47	41.17	42.56
70	42.55	37.07	35.16	37.69	36.74	41.52	43.16
71	42.55	34.86	35.2	37.79	37.09	42.17	43.46
72	43.51	34.88	35.8	39.63	30.44	42.61	43.56
73	37.03	35.07	31.22	32.62	30.54	34.87	35.17
74	37.23	35.86	31.38	32.77	30.59	35.17	35.5
75	38.35	36.59	31.63	33.32	30.6	35.77	37.11

Закінчення табл. В.5

76	38.89	38.9	31.66	33.87	30.75	36.17	37.81
77	39.26	40.13	31.73	34.11	30.91	36.5	38.06
78	39.4	40.17	32.13	34.5	33.62	36.52	38.06
79	41.98	40.23	34.19	35.06	33.67	41.22	40.95
80	42.18	40.46	35.07	35.46	33.71	41.74	41.35
81	43.13		35.11	35.68	33.83	42.22	41.39
82	43.29		35.46	36.21	33.83	42.33	41.44
83	43.44		36.19	36.73	34.53	42.59	41.95
84	44.32		36.74	37.06	29.85	43.4	42.29
85	36.63		30.43	31.4	30.19	38.98	37.24
86	36.94		30.82	32.3	30.4	39	37.84
87	38.01		31.48	32.75	30.51	39.2	37.85
88	38.57		31.94	32.9	30.91	39.28	37.85
89	38.96		32.25	32.99	31.4	39.5	37.89
90	39.25		33.17	33.58	33.44	39.51	38.14
91	41.74		33.79	36.3	33.71	39.86	39.66
92	42.1		34.1	37	33.75	40.01	40.51
93	42.39		34.84	37.55	34.44	40.23	40.61
94	42.55		35.03	37.64	34.46	40.58	40.93
95	43.46		35.07	37.9	35.72	40.99	40.95
96	43.6		35.48	37.99		41.51	41.71
$\bar{x} =$ 36.456	40.354	36.200	33.475	34.949	31.824	40.073	38.226
$Q_{\phi} =$ 6129.148	1458.626	5.244	852.737	218.065	2037.903	1255.73	300.841
$Q_{\text{зал}} =$ 5518.295	825.756	699.134	690.491	759.136	683.414	910.065	950.298
σ_{ϕ}	1021.525						
$\sigma_{\text{зал}}$	8.503						
F	120.140						

Примітка. В таблицях В.2...В.5 приводяться значення полусуми кромочних напружень в підшві рейки в одиницях виміру вимірювально-розрахункової системи. Для переходу до МПа наведені значення треба помножити на 1,333. Потреба в коефіцієнті не змінює значення дисперсій і коефіцієнту Фішера.

ДОДАТОК Д
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА НАПРУЖЕНЬ В ПІДРЕЙКОВІЙ
ОСНОВІ ВІД СУЧАСНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ



Рис. Д.1 – Підготовка місця для встановлення месдоз



Рис. Д.2 – Глибина встановлення 1-го рівня месдоз 40 см від підшви шпали



Рис. Д.3 – Встановлення 1-го рівня месдоз

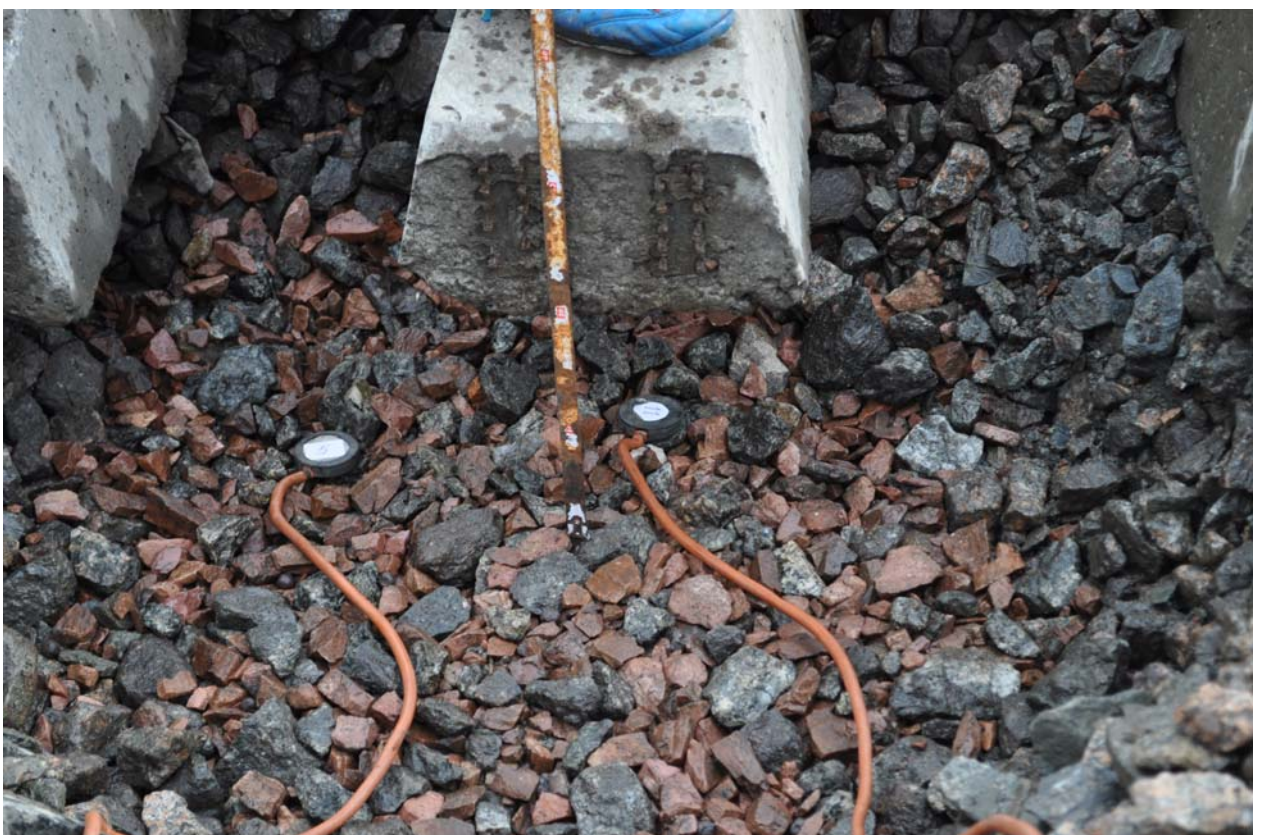


Рис. Д.4 – Глибина встановлення 2-го рівня месдоз 20 см від підшви шпали



Рис. Д.5 – Встановлення 2-го рівня месдоз



Рис. Д.6 – Дослідна ділянка, обладнана месдозами

Таблиця Д.1 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 176 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	36.2	56.9	15.1
2	35.7	63.2	13.2
3	48.9	80.5	13.4
4	38.4	69.6	13.9
5	24.0	41.8	7.8
6	18.9	35.9	7.2
7	21.3	33.3	10.0
8	20.6	37.1	7.3
9	26.8	44.1	8.5
10	19.2	36.1	6.3
11	21.4	37.5	5.3
12	19.3	33.3	9.1
13	25.8	42.4	8.1
14	22.1	37.1	11.2
15	21.8	36.6	7.7
16	15.2	26.3	6.5
17	25.7	43.4	5.7
18	20.7	38.0	7.6
19	22.0	39.2	4.9
20	14.7	24.6	7.1
21	42.2	66.9	12.3
22	37.6	66.9	10.4
23	38.5	62.4	10.4
24	31.4	56.7	9.6

1	38.6	55.3	21.0
2	38.7	64.0	18.7
3	52.3	76.0	18.5
4	39.2	68.5	14.3
5	26.6	46.2	8.1
6	20.1	34.1	9.8
7	21.1	38.2	7.2
8	22.8	36.5	13.5
9	26.5	44.6	10.4
10	21.3	39.4	8.9
11	21.5	36.8	7.5
12	18.7	32.9	10.2
13	27.3	44.9	8.3
14	23.6	39.4	11.5
15	24.9	42.9	7.7
16	18.1	31.3	9.8
17	26.3	44.7	10.1
18	23.9	38.6	11.3
19	21.7	38.1	8.5
20	16.0	25.0	8.5
21	42.3	63.2	13.9
22	39.7	67.5	13.7
23	38.8	61.0	15.0
24	32.4	57.9	11.7

Таблиця Д.2 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 160 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	35.9	50.8	25.4
2	38.8	53.5	31.8
3	49.5	69.1	22.6
4	40.4	65.2	23.5
5	27.0	44.4	13.6
6	25.3	46.0	13.2
7	26.3	42.0	16.6
8	24.9	41.2	14.5
9	30.7	45.5	16.8
10	22.3	36.0	14.8
11	24.7	39.6	13.4

12	21.6	37.0	15.3
13	30.1	50.3	13.9
14	28.9	47.0	15.3
15	26.3	43.9	14.2
16	22.4	32.0	16.9
17	30.5	46.7	14.7
18	25.1	38.0	15.3
19	24.1	41.3	12.3
20	21.5	36.1	15.6
21	40.4	58.4	17.4
22	38.5	57.2	19.4
23	37.7	58.8	16.0

Продовження табл. Д.2

24	30.8	49.3	19.0
1	41.4	58.0	32.3
2	41.3	59.4	39.0
3	54.0	72.5	30.2
4	42.5	62.2	27.7
5	28.2	42.3	19.2
6	27.9	40.5	21.3
7	29.4	42.6	19.5
8	24.9	36.7	21.7
9	31.2	41.7	19.3
10	27.2	45.0	16.1
11	25.1	34.8	19.7
12	23.7	38.6	16.6
13	31.3	46.5	19.8
14	29.5	48.4	19.6
15	27.0	39.2	18.5
16	23.9	39.9	18.6
17	31.0	47.9	18.6
18	26.3	38.6	20.0
19	25.0	39.4	17.1
20	23.4	36.0	17.7
21	42.6	61.5	21.5
22	39.6	60.3	23.6
23	39.0	55.8	21.5
24	31.8	47.6	22.3
1	36.8	48.7	31.0
2	36.8	52.3	33.7
3	50.0	69.1	28.6
4	39.2	61.0	27.6
5	27.4	42.9	18.0
6	25.0	39.2	22.9
7	26.3	39.6	19.3
8	24.2	39.3	21.7
9	29.4	40.5	22.2
10	24.3	42.8	17.6
11	24.6	34.8	21.6
12	22.8	37.2	20.1
13	31.1	52.0	18.3
14	29.1	45.8	23.0
15	26.5	43.8	18.7
16	23.6	39.2	19.0
17	31.1	47.8	18.8
18	26.3	44.7	18.6

19	24.1	38.3	16.9
20	23.4	38.8	18.2
21	40.4	54.8	24.1
22	37.5	57.2	26.2
23	39.0	57.1	23.5
24	33.3	53.4	23.7
1	36.3	50.4	26.4
2	37.1	54.0	29.1
3	52.1	72.8	24.0
4	40.1	64.7	21.7
5	26.7	44.7	14.2
6	26.3	46.1	12.8
7	27.0	42.9	14.6
8	23.4	38.0	15.0
9	28.9	44.0	16.6
10	26.1	45.5	14.2
11	24.1	38.9	14.1
12	21.9	34.6	18.7
13	30.1	48.8	17.0
14	28.1	48.6	14.5
15	26.1	40.4	13.7
16	22.2	39.3	14.0
17	30.4	47.8	15.8
18	25.6	39.3	15.6
19	24.0	41.5	13.7
20	21.4	34.9	15.0
21	41.3	64.7	18.7
22	39.7	64.8	18.3
23	39.3	63.0	16.2
24	32.5	55.3	16.4
1	37.3	46.5	33.7
2	37.2	54.6	35.9
3	50.1	68.5	30.4
4	40.8	59.6	30.9
5	29.1	42.5	19.3
6	28.5	43.0	21.4
7	26.4	38.8	19.8
8	24.8	32.5	25.3
9	28.8	38.9	21.4
10	28.0	40.9	22.9
11	25.2	36.2	20.1
12	24.5	31.4	24.6
13	30.8	43.9	22.4

Закінчення табл. Д.2

14	29.5	40.7	26.8
15	25.1	34.9	21.1
16	23.2	34.8	23.6
17	28.4	39.3	23.6
18	24.7	38.2	20.7
19	22.7	32.3	20.4
20	22.9	33.8	20.9
21	40.8	55.7	26.5
22	39.9	61.0	26.8
23	39.1	55.5	25.0
24	32.1	46.8	25.9
1	38.2	57.9	22.7
2	36.9	57.6	27.3
3	49.1	71.7	25.1
4	38.9	65.7	22.0
5	26.9	47.4	15.9
6	25.6	40.1	18.6

7		24.9	43.4	15.5
8		26.0	40.4	17.4
9		27.3	44.6	16.5
10		24.5	44.0	14.2
11		23.6	41.4	14.5
12		23.5	40.8	15.6
13		28.4	47.6	16.2
14		29.8	52.1	16.4
15		24.9	40.2	15.4
16		24.1	40.4	15.6
17		29.9	51.0	16.9
18		25.4	40.5	16.8
19		22.4	41.3	15.0
20		20.7	35.6	15.7
21		40.1	61.3	20.1
22		38.0	63.5	20.7
23		39.0	61.3	18.7
24		32.7	55.3	20.8

Таблиця Д.3 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 140 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	28.5	48.6	25.7
2	39.5	67.7	31.2
3	36.7	59.5	29.8
4	44.1	72.5	31.5
5	19.4	31.2	21.8
6	26.6	46.6	23.1
7	25.2	42.9	27.8
8	27.7	47.8	22.6
9	21.9	37.1	21.6
10	28.8	44.5	26.7
11	27.4	47.4	28.6
12	30.1	54.0	23.5
13	19.3	35.4	22.4
14	25.8	46.1	24.9
15	25.2	45.2	24.1
16	30.1	53.4	22.8
17	20.9	36.8	21.2
18	30.0	50.5	24.9
19	23.4	40.3	25.3
20	28.7	51.5	22.1
21	33.4	55.5	31.3
22	47.1	73.5	35.1

23	32.1	52.1	30.1
24	40.9	71.1	33.3
1	27.7	42.3	30.0
2	40.5	64.0	33.7
3	35.4	60.8	31.8
4	45.1	70.2	37.5
5	19.7	33.8	26.7
6	27.9	44.1	28.4
7	26.0	41.8	31.1
8	27.0	47.9	27.5
9	20.5	35.7	25.4
10	28.8	50.8	28.7
11	27.7	48.6	29.9
12	29.8	54.1	28.6
13	19.4	36.6	23.8
14	27.7	46.2	25.9
15	23.8	40.9	27.0
16	28.5	54.8	25.2
17	20.9	34.0	26.7
18	30.0	47.4	27.7
19	24.8	40.9	29.9
20	27.7	48.8	26.6

Продовження табл. Д.3

21	35.0	57.1	34.4
22	49.5	78.4	39.2
23	32.9	51.1	34.6
24	43.1	69.4	38.4
1	31.8	48.9	34.8
2	43.5	70.1	39.0
3	38.2	60.4	40.8
4	47.7	71.7	44.1
5	21.2	33.5	31.7
6	28.3	49.5	32.4
7	26.2	39.3	38.3
8	30.0	51.9	33.9
9	22.0	35.4	32.6
10	30.8	53.4	34.2
11	31.0	50.7	38.5
12	32.9	57.8	33.4
13	21.1	35.6	35.2
14	28.3	52.1	33.4
15	26.3	42.0	37.3
16	31.6	56.0	34.2
17	22.4	35.2	32.6
18	32.2	57.6	33.4
19	27.8	43.1	36.0
20	31.1	57.1	33.6
21	37.8	63.2	40.5
22	51.2	80.4	48.0
23	33.6	60.0	39.7
24	43.4	72.3	43.5
1	27.9	43.3	29.8
2	41.1	66.9	32.6
3	35.9	56.7	33.0
4	46.3	75.9	32.8
5	19.4	30.8	25.7
6	25.2	43.8	24.7
7	26.5	42.1	27.4
8	29.1	48.1	24.8
9	20.7	38.6	24.3
10	29.1	51.1	25.2
11	29.2	51.5	27.6
12	30.8	57.3	26.6
13	18.8	31.5	26.8
14	26.2	47.6	26.3
15	23.5	40.4	28.0

16	30.0	56.4	26.5
17	19.9	30.8	26.8
18	27.8	44.4	27.0
19	24.8	41.9	30.3
20	29.0	51.4	26.7
21	33.8	57.7	30.7
22	49.1	75.1	41.4
23	33.0	55.1	33.0
24	41.1	65.9	36.6
1	29.1	41.5	35.6
2	42.0	67.2	38.4
3	37.6	58.2	36.9
4	46.3	77.4	36.2
5	20.5	29.2	28.1
6	26.5	42.6	28.0
7	25.7	37.0	31.9
8	28.4	48.6	27.4
9	22.0	37.0	24.6
10	29.9	48.8	27.4
11	29.0	44.7	34.9
12	31.0	51.4	29.4
13	20.9	36.1	27.3
14	27.5	49.3	28.8
15	24.0	38.1	29.6
16	29.9	49.5	27.5
17	20.7	31.1	29.0
18	29.5	48.8	29.2
19	26.7	45.0	29.0
20	29.5	51.8	27.2
21	35.9	53.7	36.6
22	49.4	75.4	42.7
23	33.0	57.1	36.3
24	42.6	70.5	34.3
1	31.1	50.9	31.0
2	41.8	66.6	35.2
3	37.7	60.9	36.1
4	46.6	74.4	39.7
5	21.4	33.2	29.2
6	29.6	52.1	29.0
7	27.3	49.4	29.7
8	30.4	55.6	28.6
9	22.7	37.5	27.8
10	31.4	51.1	29.4

Продовження табл. Д.3

11	28.8	48.1	35.4
12	31.2	53.1	31.5
13	22.2	38.2	27.6
14	29.0	51.6	27.8
15	25.1	40.2	30.2
16	31.4	56.7	29.0
17	23.2	37.2	28.9
18	31.6	52.6	28.6
19	25.5	39.8	34.1
20	30.1	52.4	27.7
21	35.9	60.4	36.3
22	50.1	82.7	40.5
23	34.6	58.3	36.7
24	43.4	77.0	37.4
1	29.1	47.4	20.4
2	42.4	70.2	22.7
3	37.4	57.7	26.7
4	45.3	69.3	29.2
5	19.9	34.0	16.3
6	26.7	43.6	18.8
7	24.6	37.2	24.3
8	27.1	46.5	20.1
9	20.0	27.6	22.1
10	29.2	50.8	20.6
11	27.9	46.1	24.6
12	29.7	46.8	23.5
13	19.3	30.8	18.3
14	25.7	43.0	18.7
15	23.5	38.5	22.0
16	29.1	52.7	21.1
17	20.1	26.7	21.1
18	28.6	51.1	19.7
19	25.3	44.5	20.6
20	27.5	47.6	19.0
21	33.0	49.3	27.5
22	47.2	70.1	32.7
23	32.3	54.7	25.9
24	42.4	74.2	28.4
1	30.4	48.2	23.9
2	43.8	70.2	27.3
3	39.4	64.0	28.4
4	47.2	78.5	25.6
5	21.7	37.1	17.6

6	28.0	50.5	20.3
7	26.2	44.5	19.2
8	28.8	49.9	19.7
9	21.3	37.0	17.6
10	29.5	47.7	21.6
11	29.5	48.6	22.5
12	30.2	50.2	21.0
13	20.4	34.4	19.2
14	26.3	45.8	19.5
15	24.8	45.4	20.4
16	29.6	48.9	20.4
17	20.1	32.5	18.2
18	29.0	45.6	20.9
19	25.5	44.7	20.4
20	27.2	48.8	19.6
21	33.8	55.5	27.9
22	48.0	73.2	34.0
23	33.5	55.2	26.1
24	42.6	67.9	30.2
1	40.5	63.0	25.1
2	40.5	64.9	26.7
3	52.4	77.4	23.5
4	42.6	68.2	22.1
5	25.9	45.1	14.1
6	24.8	44.4	11.5
7	24.3	39.4	13.0
8	22.9	40.9	15.1
9	27.1	43.8	12.9
10	23.0	38.5	13.2
11	23.0	37.7	12.4
12	22.0	34.6	14.0
13	27.8	45.0	13.7
14	26.9	44.9	13.6
15	25.9	42.8	12.4
16	21.4	32.8	14.0
17	25.0	42.0	12.5
18	22.3	37.1	12.0
19	22.7	37.8	10.8
20	20.3	35.1	11.7
21	41.8	59.3	17.4
22	40.8	62.1	16.8
23	39.6	59.2	16.6
24	34.1	53.1	17.6

Закінчення табл. Д.3

1	31.0	52.3	33.2
2	43.0	67.8	38.3
3	39.8	64.8	31.7
4	47.9	75.2	37.0
5	22.1	37.5	24.2
6	28.1	45.1	28.1
7	27.5	44.2	28.0
8	30.8	51.8	26.2
9	21.2	30.7	26.2
10	30.4	49.4	27.6
11	29.8	46.7	31.0
12	31.7	51.8	27.7

13	21.5	30.1	29.1
14	27.4	45.2	26.4
15	25.1	36.2	28.6
16	31.2	50.3	26.2
17	21.2	33.4	24.6
18	30.7	46.7	27.3
19	27.2	44.0	28.8
20	29.8	48.2	26.5
21	36.1	57.7	32.5
22	51.1	77.5	39.4
23	34.7	54.3	32.6
24	44.0	69.9	36.5

Таблиця Д.4 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 120 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	40.5	54.7	40.0
2	42.5	60.4	42.1
3	53.7	65.7	44.0
4	43.3	61.1	40.0
5	28.7	39.7	26.5
6	25.7	35.5	28.6
7	26.6	35.2	27.8
8	24.4	34.4	28.3
9	28.3	40.9	26.3
10	26.8	39.6	25.4
11	23.8	32.3	25.9
12	25.0	33.8	27.6
13	27.2	36.4	28.0
14	28.7	38.8	29.2
15	25.0	33.9	28.0
16	24.0	33.2	25.6
17	27.6	36.7	25.9
18	23.9	31.8	26.5
19	24.4	36.2	24.4
20	22.0	27.5	26.0
21	42.5	59.2	30.2
22	42.1	60.5	31.1
23	41.0	53.5	33.6
24	35.8	47.4	33.7
1	28.9	41.0	45.9
2	43.5	66.6	49.6
3	39.2	62.9	46.6

4	50.2	79.2	46.3
5	22.6	30.9	39.2
6	31.8	52.6	37.8
7	26.4	37.1	42.3
8	33.5	60.1	37.8
9	22.3	28.7	36.6
10	33.8	56.3	38.3
11	29.5	44.9	42.8
12	34.2	57.8	40.3
13	23.4	30.8	39.3
14	32.1	55.1	37.4
15	25.6	41.0	36.9
16	34.1	55.6	39.2
17	22.8	31.2	37.2
18	33.3	53.6	38.7
19	28.2	42.6	40.2
20	33.0	54.5	38.8
21	37.6	58.2	43.5
22	52.5	79.7	51.7
23	33.0	53.7	46.3
24	44.9	71.2	49.7
1	39.5	59.6	47.5
2	40.8	61.6	48.6
3	53.4	73.7	49.2
4	43.1	63.3	45.9
5	28.2	48.2	33.7
6	25.9	41.5	33.9
7	25.4	41.0	37.4

8	24.7	43.0	34.7
9	28.1	43.5	33.8
10	25.7	40.7	34.2
11	23.8	42.0	34.7
12	24.7	36.6	36.4
13	27.6	44.5	33.5
14	29.3	45.5	35.4
15	25.4	40.9	35.0
16	25.0	39.7	33.8
17	27.8	44.0	33.7
18	25.3	41.3	33.5
19	24.7	37.6	32.7
20	24.3	37.7	32.7
21	42.0	61.7	38.8
22	41.1	61.9	42.4
23	41.2	62.0	40.4
24	35.5	55.3	40.6
1	29.8	35.6	49.5
2	43.3	58.9	52.3
3	38.8	50.0	53.6
4	48.3	63.8	54.4
5	22.6	28.7	39.7
6	31.2	37.1	44.6
7	26.5	32.0	45.7
8	33.1	44.0	45.0
9	23.3	28.1	41.0
10	34.4	47.1	46.8
11	30.4	37.1	48.7
12	34.3	48.6	45.2
13	23.6	27.0	43.3
14	32.4	43.1	45.6
15	25.6	33.0	46.9
16	33.1	42.3	47.6
17	23.3	29.8	39.9
18	34.6	44.9	47.2
19	26.9	34.4	47.0
20	32.2	49.4	44.9
21	36.6	48.4	52.7
22	51.3	69.5	58.9
23	34.4	46.2	53.1
24	44.5	61.9	54.7
1	39.9	51.5	49.6
2	40.9	57.3	50.6

Продовження табл. Д.4

3	52.5	64.3	48.5
4	43.4	63.1	41.3
5	26.7	32.5	34.4
6	25.3	34.0	35.3
7	27.4	30.9	34.2
8	25.5	31.7	33.4
9	28.8	35.4	34.0
10	25.5	32.7	34.4
11	24.9	29.6	32.0
12	23.8	32.3	33.2
13	28.9	35.5	33.4
14	28.8	38.2	34.7
15	26.9	32.2	34.4
16	25.0	29.6	34.4
17	28.5	37.1	33.5
18	24.5	31.8	32.0
19	24.2	28.5	32.8
20	22.7	29.1	32.0
21	42.4	56.4	38.5
22	41.3	56.9	39.3
23	41.4	55.3	37.6
24	35.0	49.3	37.9
1	29.2	42.1	49.1
2	45.1	70.7	50.9
3	40.1	61.6	49.8
4	50.3	77.5	48.7
5	23.0	29.5	39.5
6	33.2	55.5	41.7
7	27.4	39.6	47.0
8	35.1	60.6	41.6
9	24.0	33.4	40.5
10	35.8	59.2	44.3
11	31.3	46.6	46.1
12	36.2	59.0	42.5
13	25.2	35.2	40.8
14	34.2	55.1	43.7
15	26.9	40.4	43.5
16	35.9	54.7	44.4
17	24.0	30.2	42.0
18	35.5	56.4	43.1
19	28.4	42.0	41.0
20	35.1	52.5	42.4
21	38.8	57.4	47.5
22	54.3	79.9	52.9

Закінчення табл. Д.4

23	36.7	58.7	47.9
24	46.9	73.3	52.1
1	36.3	44.9	54.8
2	36.4	45.1	54.6
3	49.4	63.0	53.3
4	39.7	55.7	48.8
5	26.6	33.9	38.0
6	24.0	28.5	40.8
7	27.1	31.7	41.4
8	23.3	29.9	38.3
9	28.2	31.7	42.8
10	22.2	28.0	38.4
11	23.5	28.1	39.0
12	20.7	26.0	39.3
13	25.6	32.9	39.4
14	25.6	31.9	42.7
15	27.3	35.7	40.7
16	21.0	27.6	37.7
17	27.1	34.3	37.4
18	23.3	26.9	38.9
19	25.1	29.7	39.0
20	18.7	23.7	34.6
21	40.8	53.4	43.5
22	40.2	55.1	44.3
23	39.3	52.5	44.4

24	32.1	45.6	43.7
1	31.7	45.7	54.6
2	45.7	66.4	57.1
3	41.4	62.4	55.8
4	50.1	77.3	56.5
5	24.9	34.4	42.4
6	32.9	51.4	46.4
7	28.2	40.8	49.3
8	36.1	60.0	49.4
9	25.0	37.6	44.2
10	35.8	58.8	46.9
11	32.3	48.9	48.6
12	37.2	58.5	47.6
13	23.3	29.9	44.9
14	34.0	51.8	47.5
15	27.1	37.8	49.3
16	37.2	56.7	50.9
17	25.3	29.7	48.3
18	36.5	54.3	51.5
19	26.1	38.5	52.1
20	34.7	49.9	52.0
21	40.1	58.7	55.8
22	55.6	81.5	60.9
23	35.3	50.7	60.5
24	47.6	69.4	63.4

Таблиця Д.5 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 80 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	36.9	43.4	57.0
2	38.0	45.6	57.6
3	50.2	60.8	55.7
4	39.8	58.4	47.4
5	27.9	32.2	41.9
6	25.9	31.1	41.1
7	26.4	29.3	42.4
8	23.1	26.7	41.0
9	29.7	35.5	41.2
10	24.8	32.5	38.5
11	27.1	30.3	43.2
12	24.3	29.3	41.9
13	29.8	35.1	41.1
14	28.5	38.6	42.0

15	28.5	33.0	40.7
16	23.6	26.7	39.6
17	29.8	35.1	40.3
18	26.5	33.6	38.6
19	28.0	30.3	42.0
20	22.0	28.2	35.0
21	43.2	59.2	45.8
22	42.4	59.4	46.2
23	40.6	55.1	44.5
24	33.6	44.7	43.5
1	30.8	40.4	51.1
2	42.9	63.2	52.9
3	41.5	56.3	55.0
4	47.1	69.1	53.8

Продовження табл. Д.5

5	19.3	21.2	42.6
6	30.6	37.8	48.5
7	23.0	27.0	48.8
8	30.0	38.3	48.1
9	19.4	21.4	45.6
10	33.3	43.8	49.3
11	26.2	33.3	53.6
12	32.1	41.4	49.8
13	19.5	19.8	42.5
14	30.8	42.3	46.4
15	22.2	24.0	47.7
16	33.0	41.3	49.7
17	20.9	25.1	46.4
18	32.7	42.4	49.4
19	23.3	28.8	46.9
20	31.5	45.7	48.0
21	38.7	52.7	57.0
22	52.8	72.0	60.2
23	34.0	47.1	59.3
24	43.2	61.5	59.6
1	38.6	52.7	56.7
2	38.3	56.4	57.5
3	52.6	71.7	54.3
4	38.9	58.2	51.7
5	29.0	41.2	39.8
6	27.0	37.2	41.3
7	27.2	37.0	44.5
8	24.5	36.0	42.8
9	29.9	40.2	41.9
10	25.2	33.9	41.4
11	26.2	36.7	40.3
12	23.2	32.5	39.5
13	29.0	39.3	41.1
14	29.0	38.2	44.0
15	27.2	36.7	40.6
16	23.4	31.8	39.7
17	28.2	41.2	39.2
18	25.2	32.8	40.9
19	25.8	33.2	37.2
20	19.9	22.6	36.3
21	42.1	60.5	43.3
22	42.7	63.2	44.3
23	39.9	56.3	43.8
24	35.6	50.3	44.7

1	33.5	49.4	57.4
2	46.2	71.6	58.2
3	43.3	62.9	63.2
4	50.1	77.5	59.2
5	21.6	29.5	43.8
6	33.3	46.7	48.5
7	24.6	32.9	48.5
8	33.6	53.7	51.3
9	22.2	29.0	44.5
10	35.0	50.9	50.9
11	27.1	35.9	53.7
12	34.6	50.9	50.9
13	21.3	28.8	45.5
14	33.0	46.3	50.2
15	24.6	31.7	48.8
16	35.2	50.7	50.4
17	22.3	29.3	45.9
18	35.4	53.6	48.1
19	25.4	34.1	47.8
20	34.2	52.5	49.9
21	41.2	60.5	58.0
22	55.5	84.1	61.3
23	36.1	52.5	60.6
24	46.9	73.2	61.7
1	37.1	45.8	58.9
2	36.7	48.7	61.0
3	50.8	69.1	56.2
4	38.7	55.7	52.6
5	27.6	37.8	43.8
6	26.0	34.8	43.7
7	25.4	29.3	46.0
8	23.5	25.3	45.0
9	28.8	37.5	45.5
10	24.6	26.6	47.7
11	23.9	28.7	44.8
12	22.8	26.9	43.4
13	28.6	38.6	46.6
14	28.6	36.0	47.4
15	27.6	31.9	45.9
16	23.1	29.5	42.9
17	26.4	30.9	46.9
18	24.4	32.4	44.4
19	25.6	33.3	43.8

Закінчення табл. Д.5

20	19.7	26.5	41.1
21	42.8	58.4	48.6
22	41.4	55.5	49.6
23	38.9	53.7	48.0
24	33.6	45.0	50.9
1	33.5	43.9	57.6
2	45.2	66.3	57.3
3	41.6	55.7	60.9
4	48.7	68.2	56.4
5	21.0	28.5	41.6
6	32.8	46.8	51.9
7	24.2	28.6	51.5
8	32.1	45.2	49.6
9	20.2	25.9	46.8
10	35.0	47.9	52.2
11	27.4	36.6	53.2
12	34.3	47.1	54.1
13	19.6	20.5	47.2
14	31.9	42.6	49.6
15	23.1	23.4	52.1
16	33.8	44.2	52.1
17	21.5	27.2	46.0
18	33.7	44.4	52.0
19	24.1	29.0	50.8
20	32.4	44.1	51.7
21	39.1	52.6	58.1
22	52.8	77.4	60.5
23	36.3	47.8	62.0
24	45.3	63.3	62.1
1	39.6	58.7	55.4
2	39.1	55.7	57.2
3	50.6	69.8	53.1
4	39.8	57.6	46.9
5	29.5	48.6	40.2
6	27.6	45.4	40.0
7	28.1	40.9	41.4
8	25.9	39.7	37.9
9	32.4	47.6	39.8

10	26.6	38.0	39.3
11	26.4	38.6	38.7
12	25.6	32.5	42.7
13	31.0	44.4	41.9
14	29.2	42.0	42.1
15	31.0	43.1	43.5
16	24.9	38.1	38.9
17	30.7	41.8	41.3
18	25.9	35.0	41.4
19	27.6	36.4	40.0
20	22.2	29.3	39.8
21	44.5	65.9	44.0
22	41.5	61.9	45.2
23	42.1	63.2	48.0
24	36.7	56.3	45.3
1	31.8	42.4	48.2
2	43.7	63.8	53.4
3	40.0	55.1	54.6
4	47.9	69.9	51.0
5	20.3	25.8	39.4
6	31.8	47.4	42.5
7	22.9	29.0	45.4
8	31.8	44.5	46.0
9	21.2	28.3	41.3
10	33.9	50.4	45.4
11	26.7	36.8	49.1
12	33.4	46.2	48.7
13	20.6	27.6	41.2
14	31.4	45.2	45.6
15	23.2	31.3	43.9
16	33.7	46.8	50.0
17	22.1	27.9	41.5
18	34.0	46.6	46.5
19	24.3	33.8	44.5
20	32.8	45.5	48.0
21	40.3	57.3	54.4
22	53.7	81.1	58.2
23	36.8	52.7	55.9
24	45.6	65.2	59.4

Таблиця Д.6 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 60 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	35.7	49.4	44.9
2	37.6	51.0	48.8
3	48.8	66.7	44.0
4	39.5	58.0	41.5
5	27.2	39.4	33.9
6	25.4	35.6	33.5
7	25.1	33.2	33.9
8	22.8	30.1	32.8
9	28.5	39.7	34.7
10	23.4	29.0	34.2
11	22.5	28.3	34.1
12	21.7	25.8	33.6
13	27.7	35.7	35.9
14	27.9	35.5	37.6
15	25.1	31.9	33.9
16	21.1	21.9	34.2
17	27.9	36.1	34.2
18	24.0	30.2	34.7
19	23.3	29.2	35.5
20	19.4	22.9	33.6
21	40.3	54.0	38.9
22	40.4	53.6	41.7
23	38.2	52.7	40.5
24	33.7	46.3	39.6

1	35.9	53.4	47.5
2	45.4	70.5	45.8
3	41.1	60.3	49.3
4	47.1	69.8	48.9
5	21.6	29.8	32.6
6	31.5	45.6	38.1
7	23.5	35.1	36.0
8	30.7	47.8	35.6
9	21.8	30.2	33.9
10	33.6	52.6	38.7
11	28.5	37.6	39.8
12	32.7	50.5	41.4
13	21.3	31.9	32.0
14	31.7	47.3	37.3
15	24.8	33.9	37.5
16	34.2	50.7	41.1
17	23.7	35.0	32.9
18	35.6	51.8	37.5
19	24.9	35.2	38.7
20	32.9	50.5	38.3
21	43.5	65.3	48.4
22	54.9	80.2	52.5
23	37.8	57.4	51.5
24	45.7	73.1	53.1

Таблиця Д.7 – Максимальні спостережені значення тиску в баласті в кПа для швидкості 40 км/год за номерами месдоз

Вісь	№1	№2	№3
1	36.9	47.6	43.7
2	37.7	50.5	48.3
3	50.2	70.1	42.7
4	40.4	62.1	38.8
5	28.3	44.6	30.2
6	26.7	40.2	31.6
7	26.0	34.5	29.9
8	24.1	34.1	32.0
9	30.1	41.8	30.4
10	23.9	34.3	30.2
11	25.0	35.4	28.2

12	23.1	33.3	29.6
13	28.8	40.2	30.7
14	27.7	38.8	32.0
15	28.2	40.3	29.6
16	23.0	30.7	29.4
17	28.2	38.9	29.4
18	24.1	34.8	29.2
19	24.8	35.5	27.5
20	20.6	26.1	27.3
21	42.9	61.9	33.8
22	42.2	62.0	34.6
23	40.5	58.5	33.3

Продовження табл. Д.7

24	35.3	52.9	33.3
1	33.3	48.3	44.3
2	43.4	65.3	46.9
3	40.0	56.9	48.4
4	46.0	67.5	46.9
5	23.9	34.0	35.0
6	33.0	49.3	39.2
7	22.5	28.5	36.7
8	31.8	47.8	41.2
9	24.4	36.1	35.3
10	35.6	51.0	41.1
11	27.7	40.1	39.8
12	35.2	51.8	40.6
13	24.3	33.2	33.9
14	34.0	50.2	38.8
15	24.0	34.5	36.1
16	35.9	54.5	41.1
17	24.6	35.6	34.9
18	36.3	53.1	38.4
19	23.5	33.6	35.8
20	33.9	51.3	37.9
21	43.3	62.2	45.3
22	55.3	80.0	49.4
23	36.1	54.2	44.1
24	46.3	68.2	46.0
1	34.6	43.1	41.6
2	36.4	48.4	44.7
3	47.2	62.9	40.4
4	37.9	56.1	37.1
5	24.8	33.8	28.6
6	22.5	32.7	30.0
7	23.9	30.7	28.8
8	21.6	27.4	28.8
9	26.8	33.8	30.0
10	21.0	27.1	29.1
11	21.9	29.2	27.9
12	20.6	28.7	28.6
13	25.3	33.0	29.2
14	24.2	33.5	31.0
15	24.9	31.9	28.3
16	21.1	27.5	28.3
17	24.9	33.6	28.3
18	21.0	27.6	28.7

19	21.1	26.3	26.4
20	17.2	19.6	26.5
21	39.0	55.1	32.0
22	38.5	53.9	33.1
23	37.3	53.5	32.0
24	31.4	44.2	32.2
1	32.4	41.8	41.4
2	42.2	57.7	42.3
3	39.0	52.5	42.8
4	45.7	63.8	41.4
5	20.6	26.1	29.0
6	32.7	45.2	34.1
7	21.9	27.9	31.2
8	31.4	44.9	33.1
9	22.9	26.6	30.3
10	34.7	47.8	35.4
11	25.9	32.9	33.4
12	34.6	50.2	34.3
13	23.2	30.4	30.2
14	33.6	47.6	33.4
15	23.0	28.1	31.8
16	34.6	51.3	34.9
17	24.5	32.7	29.4
18	35.0	48.6	34.2
19	23.8	31.4	32.1
20	32.1	46.1	34.3
21	41.7	61.7	42.7
22	53.8	78.9	45.1
23	34.2	48.7	41.2
24	45.4	66.6	41.7
1	33.7	43.4	41.3
2	36.0	48.2	45.6
3	45.9	60.0	42.9
4	36.0	56.0	38.4
5	24.0	34.9	31.8
6	21.5	27.6	34.2
7	22.1	29.7	30.7
8	20.2	25.5	30.2
9	25.9	33.9	32.0
10	19.9	25.8	31.7
11	20.8	26.3	29.4
12	18.4	22.2	31.3
13	24.6	31.7	30.7

14	22.9	30.3	33.5
15	24.6	32.3	29.5
16	19.8	24.6	29.1
17	23.5	31.9	29.9
18	20.1	26.5	29.9
19	20.9	26.7	26.6
20	17.1	19.3	27.3
21	39.0	53.5	34.3
22	39.2	56.2	36.8
23	35.4	50.9	33.1
24	30.9	44.4	33.6
1	30.7	40.4	41.4
2	34.0	44.5	44.5
3	43.6	58.3	42.0
4	34.1	51.1	37.7
5	20.4	29.2	28.8
6	19.7	30.2	30.2
7	20.1	26.7	28.6
8	17.7	23.0	28.8
9	23.9	33.3	29.9
10	19.0	25.5	28.9
11	18.1	24.6	26.7
12	16.5	19.3	27.3
13	22.2	31.3	29.2
14	21.3	28.5	30.7
15	21.5	29.8	26.8
16	17.8	24.9	27.0
17	22.6	34.3	27.5
18	18.1	25.0	28.0
19	18.9	25.3	24.5
20	14.6	19.8	23.7
21	35.6	54.7	32.0
22	36.0	53.9	35.3
23	33.2	50.5	32.3
24	28.8	46.0	30.9

ДОДАТОК Е
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В
ПІДШПАЛЬНІЙ ОСНОВІ

Вихідні дані: рейки Р65, залізобетонні шпали, скріплення КБ, баласт щебенекий 0,5 м з модулем деформації 200 МПа, ґрунт з модуль деформації 25 МПа (загальний модуль деформації підрейкової основи 40 МПа). Система координат відповідає рис. 3.24. Напруження побудовані на час набуття сили 118 кН в точці ($x=0.8$; $z=0$), що співпадає з віссю шпали № 9.

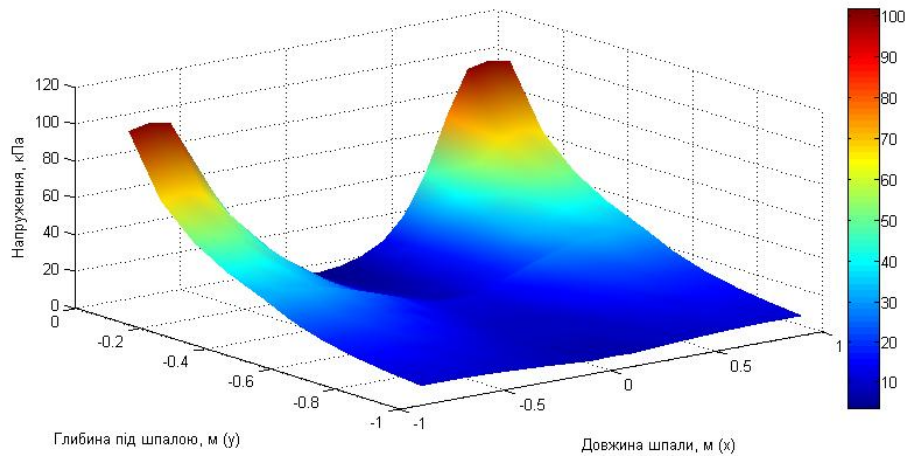


Рисунок Е.1 – Розподілення напружень під шпалою № 9 ($z=0$ м)

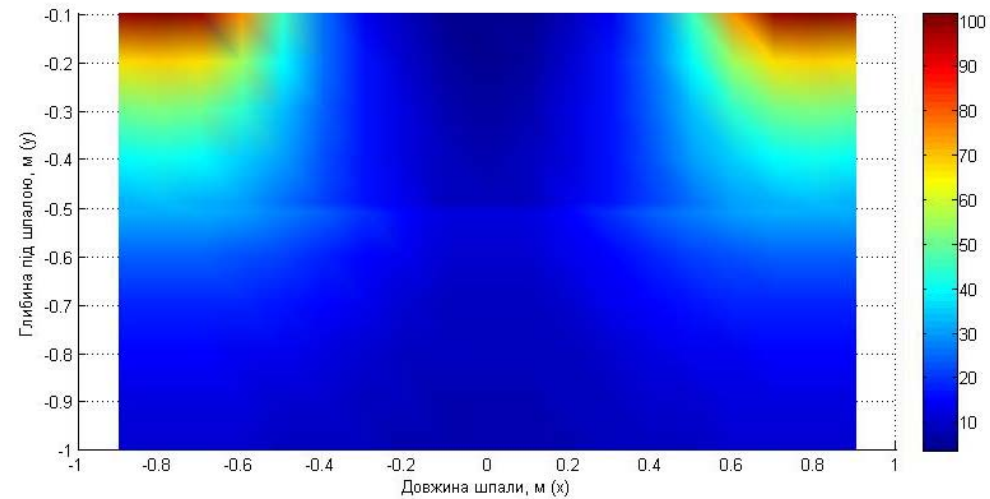


Рисунок Е.2 – Проекція розподілення напружень під шпалою № 9 ($z=0$ м)

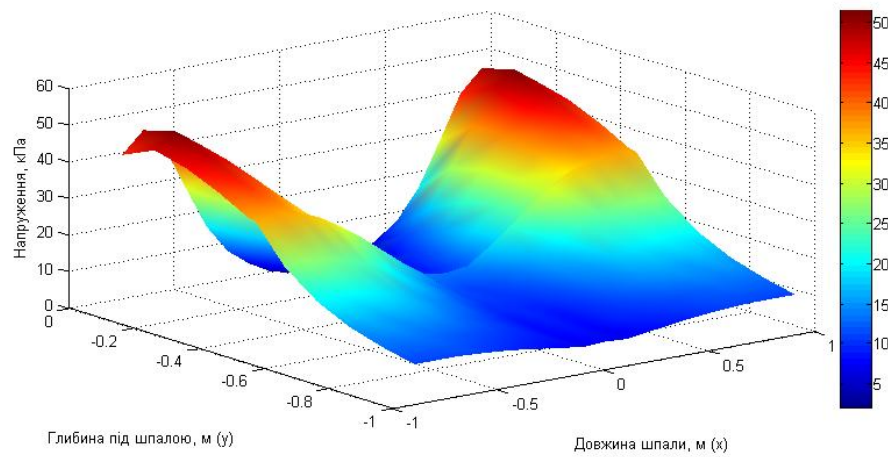


Рисунок Е.3 – Розподілення напружень між шпалами № 9 і 10
($z=0.27$ м)

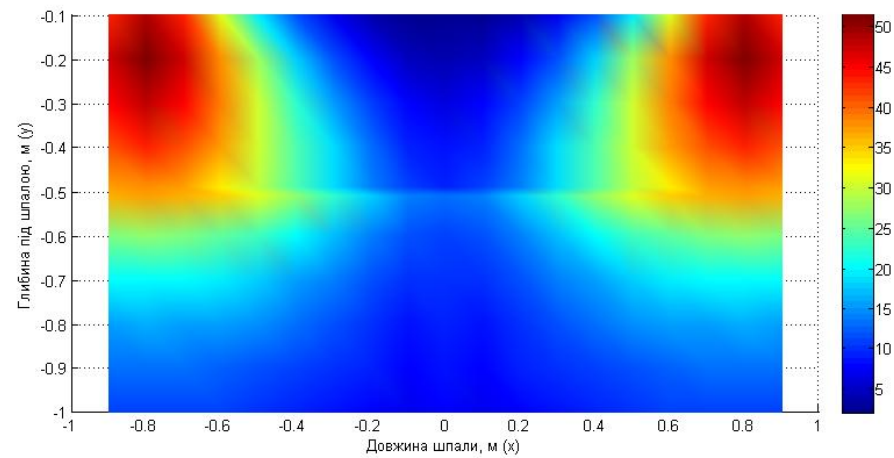


Рисунок Е.4 – Проекція розподілення напружень між
шпалами № 9 і 10 ($z=0.27$ м)

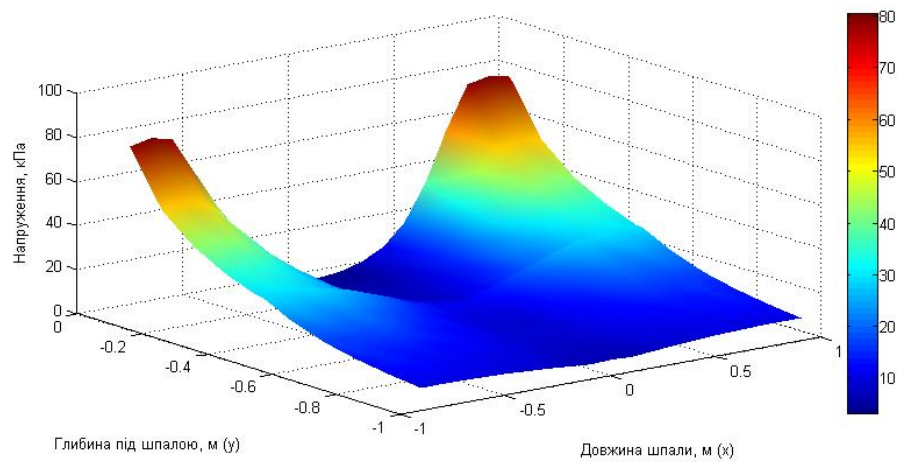


Рисунок Е.5 – Розподілення напружень під шпалою № 10
($z=0.54$ м)

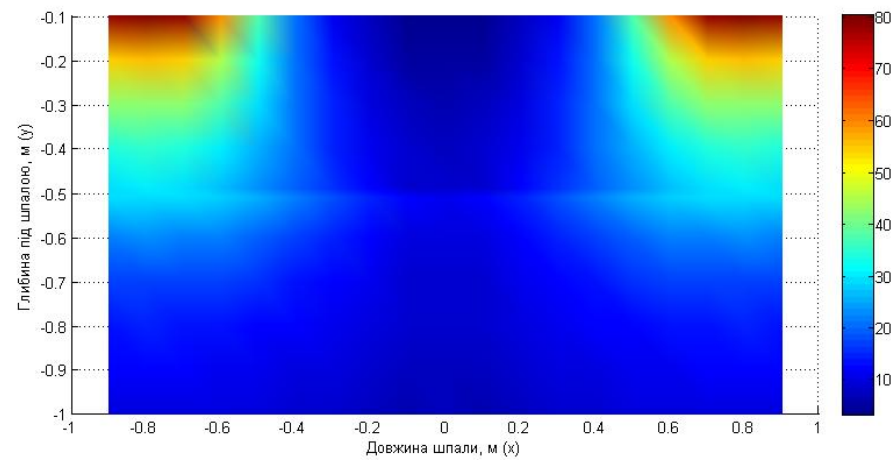


Рисунок Е.6 – Проекція розподілення напружень під
шпалою № 10 ($z=0.54$ м)

Вихідні дані: рейки Р65, залізобетонні шпали, скріплення КБ, баласт щебенекий 0,5 м з модулем деформації 100 МПа, ґрунт з модуль деформації 15 МПа (загальний модуль деформації підрейкової основи 21 МПа). Система координат відповідає рис. 3.24. Напруження побудовані на час набуття сили 145 кН в точці ($x=0.8$; $z=0$), що співпадає з віссю шпали № 9.

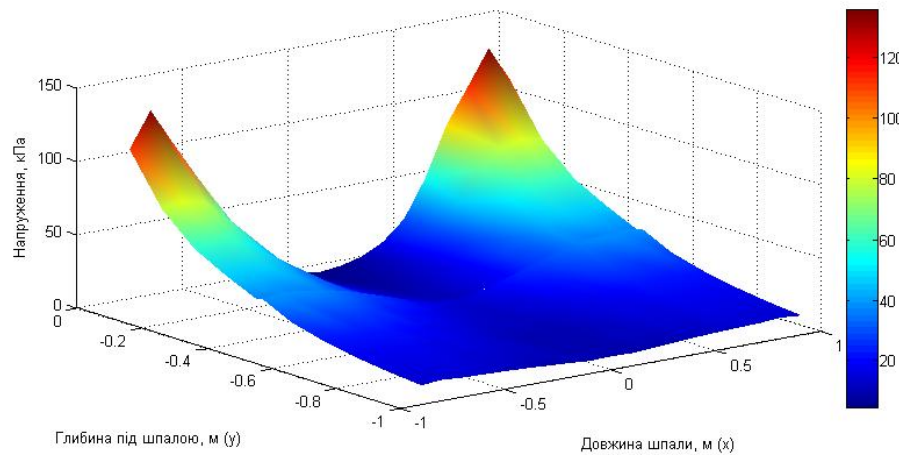


Рисунок Е.7 – Розподілення напружень під шпалою № 9 ($z=0$ м)

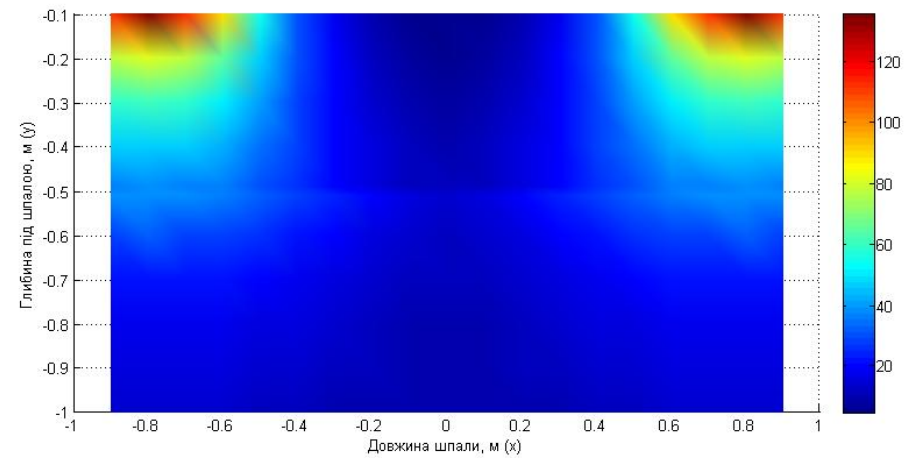


Рисунок Е.8 – Проекція розподілення напружень під шпалою № 9 ($z=0$ м)

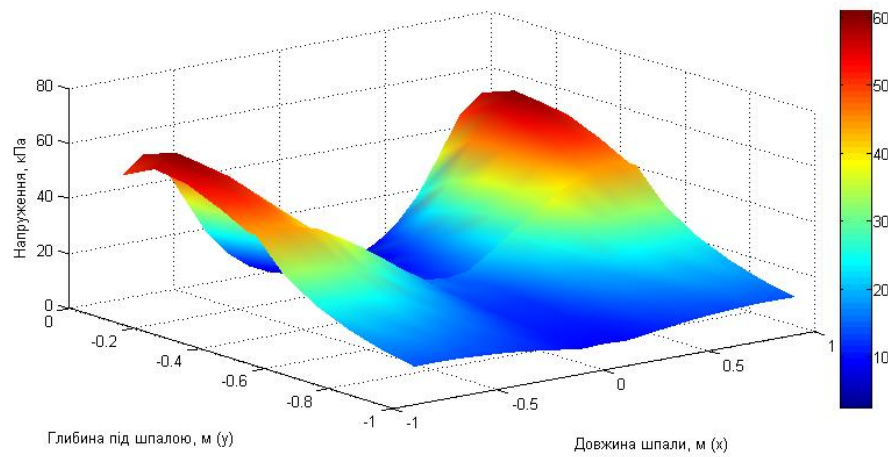


Рисунок Е.9 – Розподілення напружень між шпалами № 9 і 10
($z=0.27$ м)

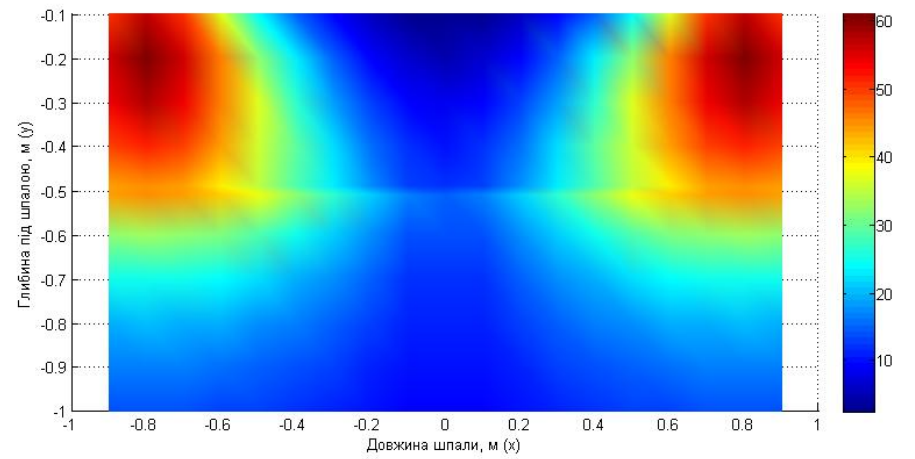


Рисунок Е.10 – Проекція розподілення напружень
між шпалами № 9 і 10 ($z=0.27$ м)

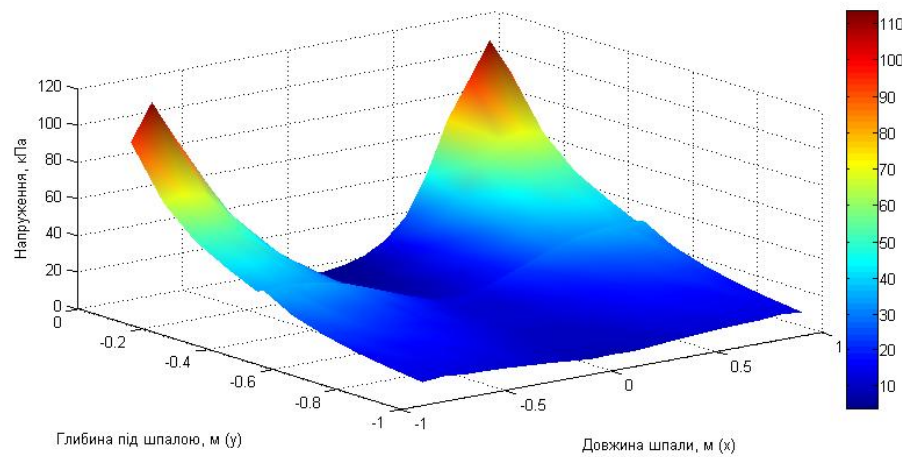


Рисунок Е.11 – Розподілення напружень під шпалюю № 10 ($z=0.54$ м)

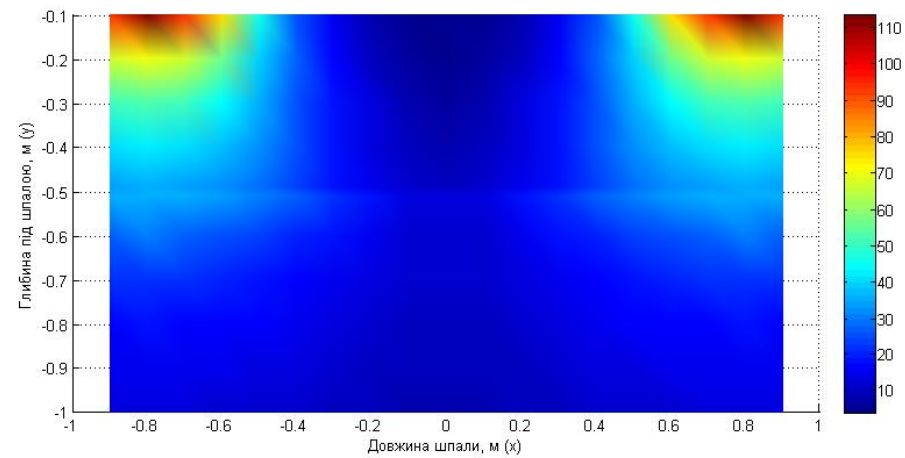


Рисунок Е.12 – Проекція розподілення напружень під шпалюю № 10 ($z=0.54$ м)

ДОДАТОК Ж
РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ В ПРОГРАМНОМУ ПРОДУКТІ

В 3-му розділі даної дисертаційної роботи наведено математичний опис просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності. Опис включає всі принципові математичні розв'язки для можливості практичної реалізації моделі в будь-якому програмному забезпеченні відповідного призначення. В більшій мірі це можуть бути сучасні мови програмування високого рівня.

Автором для реалізації математичної моделі і виконання подальших розрахунків було використано програмне середовище CodeGear RAD Studio (Delphi). Наприклад, рис. 3.4, 3.10–3.12, 3.28, 3.30, 3.32, 3.35, 5.17 отримані, використовуючи Screenshot з вікон програми під час її роботи. Обробка результатів, як масивів даних, відбувалася як безпосередньо можливостями розробленої програми, так і за допомогою інших програмних продуктів відповідного призначення.

Код програмної реалізації має великий обсяг, процес її створення не відноситься до спеціальності, за якої виконано дисертацію, і безпосередньо не входить до поставлених задач, тому в повному вигляді не наводиться. Застосування методів об'єктно орієнтованого програмування унеможливило представлення реалізації програми як єдиного алгоритму. Основною частиною програми є цикл розрахунку напружено-деформованого стану системи для поточного часового кроку, який повторюється в заданому користувачем часовому діапазоні. Тому надалі наведено алгоритм такого циклу, як опис послідовності основних операцій.

Для пояснення операцій наприкінці даного додатку наводяться фрагменти програмного коду, з реалізацією інтерфейсів основних класів, що мають стосунки до математичної моделі:

- TGlobal – клас об'єкту, що включає списки основних об'єктів і методи для загальних операцій. В програмі присутній один об'єкт такого класу для організації загальних зв'язків;
- TWaveObject – клас об'єкту, з яких складається система залізнична колія: рейка, шпала, скріплення тощо. Об'єкти великої

протяжності як правило розбиваються на декілька, наприклад, баластний шар може задаватися як низка об'єктів, розташованих під кожною шпалою. Основні поля: геометричні координати положення і фізичні властивості речовини. Основні методи: визначення параметрів розповсюдження напружень в даній речовині, геометричний опис поверхні, яка обмежує об'єкт, методи визначення перетину обмежуючих поверхонь векторами. Приклад для об'єкту залізобетонної шпали наведено в Додатку А.

- TVector – клас об'єкту «вектор». Множина векторів, якою моделюється поширення фронту взаємодії реалізована як набір об'єктів цього класу. Основні поля: геометричні параметри вектору, фізичні характеристики для розрахунку переміщення вектору на поточному часовому кроці, показники входження вектору в той чи інший об'єкт. Основні методи: визначення координат вектору під час його руху, що включає задачі перевірки виходу вектора за межі об'єкту, входження вектору в наступний об'єкт, зміна фізичних властивостей при перетині контакту об'єктів тощо.

- TCell – клас об'єктів для реалізації елементів сегменту, обмежених чотирма суміжними векторами (див. рис. 3.18). Набір таких об'єктів формує поверхню фронту розповсюдження. Основні поля: посилання на об'єкти векторів, які утворюють даний елемент. Основні методи: на основі координат векторів визначення геометричних параметрів елементу – координат, просторових кутів, площі тощо.

- TPower – клас об'єктів для реалізації прикладання зовнішнього навантаження. Основні поля: геометричні (координати, область, напрямок тощо), часові, фізичні (параметри руху, зміни) та інші параметри зовнішнього навантаження. Основні методи: керування утворенням масивів різних об'єктів різних класів, потрібних для реалізації поширення дії даної сили, керування методами розрахунків напружень і деформацій.

- TNapruugenCell – клас об'єктів для визначення напружено-деформованого стану елементів сегменту. Об'єкти цього класу створюються у відповідність до об'єктів класу TCell. Але, якщо об'єкти TCell «існують»

тільки на поверхні останнього сегменту (на фронті розповсюдження), а потім знищуються, то об'єкти `TNaprigenSfera` залишаються і утворюють сегменти, кожен з яких потім описується рівнянням в системі (3.60). Основні поля: узагальнені геометричні і фізичні властивості елементу (координати центра площадки, площа, вага, кути в просторі). Основні методи: розрахунок напружень і деформацій в області елементу на основі розв'язку загальної системи рівнянь і отримання осьових напружень.

- `TNaprigenSfera` – клас об'єктів для реалізації сегменту (див. рис. 3.14). Основні поля: масив об'єктів `TNaprigenSfera`, які складають поверхню сегменту, узагальнені дані по ним, такі як сумарна маса, сумарна площа з врахуванням кутів положення елементу тощо). Основні методи: представлення сегменту рівнянням у загальній системі.

Послідовність основних операцій для поточного часового кроку розрахунків

1. Приймається чергова сила (об'єкт класу `TPower`) з масиву зовнішнього навантаження.

2. З множини векторів (об'єктів класу `TVector`) формується масив, відповідний до сили. Для кожного вектору визначається нове положення з урахуванням його параметрів і параметрів об'єкту, в якому він знаходиться. Виконується перевірка виходу вектора за межі об'єкта. Якщо така подія має місце, встановлюється об'єкт, в який перейшов вектор, відбувається корегування параметрів вектору, в тому числі координат положення його кінця.

3. Створюється масив елементів (об'єктів класу `TCell`), які пов'язують кінці векторів в поверхню – фронт взаємодії.

4. На основі масиву об'єктів `TCell` створюється масив об'єктів класу `TNaprigenCell`, який поєднує елементи, що належать до одного геометричного об'єкту. Тому таких масивів може створюватись декілька. Для кожного об'єкту класу `TNaprigenCell` застосовуються методи, які виконують

розрахунки потрібних параметрів. Після цього масив об'єктів TCell може бути звільнений.

5. На основі кожного нового масиву об'єктів TNaPrugenCell створюється новий об'єкт класу TNaPrigenSfera і додається до загального масиву таких об'єктів. Викликаються методи, які виконують розрахунки параметрів, необхідних до додавання чергового рівняння до загальної системи рівнянь.

6. Через об'єкт класу TPower викликаються методи розв'язки загальної системи рівнянь.

Фрагменти програмного коду з реалізацією інтерфейсів основних класів математичної моделі

```
TGlobal=class
public
  ListObject: TList; //Список об'єктів
  ListPower: TList; //Список сил
  ListCell: TList; //Список елементів сегменту (рис. 3.18)
  Er: double; //Різниця напружень, яка приймається як нульова
  constructor Create;
  destructor Destroy; override;
  //Допоміжні методи обробки чисельних даних
  function StrToDouble(str: string): double;
  function DoubleToString3(x: double): string;
  function DoubleToStringEx(x: double; n: byte): string;
  function Rad(x: double): double;
  function GRad(x: double): double;
  function ArcSin(const X : Double) : Double;
  //Перерахунок координат точки з локальної в глобальную систему
  procedure BridgEx(DX,DY,DZ: double; Pitch,Turn,Roll: double; Var X,Y,Z: extended);
  //Визначення просторових кутів нахилу відрізка
  procedure BridgExUp(X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2: double; Var Pitch,Turn,Roll: double);
  //Площа трикутника
  function SGerona(pp1,pp2,pp3: R3D): double;
  //Перевірка чи ні є два об'єкта однієї речовини (протяжні об'єкти простіше задавати як
  декілька однакових
  function IdenticalObject(AWaveObject,BWaveObject: pointer): boolean;
  //Повертає кут перетину прямої і площини
  function AngleCrossGrad(Xout, Yout, Zout, Xin, Yin, Zin: double; p1,p2,p3: R3D): double;
  //Апроксимація 3 точок параболою
  function ABCparabola3Point(P1,P2,P3: R3D; Var A,B,C: extended): boolean;
end; {TGlobal}
```

TWaveObject=Class

```
GLScene: TGLScene; //Візуалізація об'єкту
List: TList; //Список трикутників (TGLPolygon), складаючих поверхню об'єкту
Name: string; //Ім'я об'єкту
Global: TGlobal; //Посилання на об'єкт з глобальними полями та функціями
//Фізичні властивості: модуль Юнга, коеф. Пуассона, щільність, демп.
_E: double;
_s: double;
_ro: double;
_eta1: double;

ColorR,ColorG,ColorB: double;
FormFactor: integer;
constructor Create(AGlobal: TGlobal; AGLScene: TGLScene);
destructor Destroy; override;
//Методи завантаження-збереження об'єкту з вікон програми і файлів
procedure LoadFromStringGrid(StringGrid: TStringGrid);
procedure WriteToStringGrid(StringGrid: TStringGrid; X,Y,Z: double);
procedure LoadFromValueEditor(ValueEditor: TValueListEditor);
procedure WriteToValueEditor(ValueEditor,ValueEditor2: TValueListEditor);
procedure SaveToFile(FileName: string; new: boolean);
procedure LoadFromFile(FileName: string);
function AddNewGLPolygon: TGLPolygon;
//Визначення параметрів площини за координатами трикутника
procedure GetABCD(GLPolygon: TGLPolygon; Var A,B,C,D: double);
//Методи перевірки входження в простір об'єкту точки, відрізка, прямої з визначенням
координат перетину стінки
function IncludePoint(X,Y,Z: double; Var Item: integer): boolean;
function IncludeLine(X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2: double; Var Item: integer; Var X,Y,Z: extended):
boolean;
function IncludeLineTring(X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2: double; Item: integer; Var X,Y,Z: double):
boolean;

procedure ClearGLPolygons;
//Методи визначення розрахункових властивостей хвилі в середовищі об'єкту
function _K_kN: double;
function _nu: double;
function _Cl: double; virtual;
function _Ct: double; virtual;
//Визначення кута нахилу відрізка
function AngleCrossGrad(Xout,Yout,Zout,Xin,Yin,Zin: double; Item: integer): double;
//Визначення входження точки в межі трикутника
function InclS(GLPolygon: TGLPolygon; x,y,z: double): boolean; protected
function Incl(w1,w2,w: double): boolean;
end; {TWaveObject}
```

TVector=class

```
//Посилання на об'єкт поверхні фронту, яку визначає даний вектор
Sfera: TGLLines;
```

```

//Координати початку і кінця вектору, точки перетину чогось при наявності
Point1,Point2,PointIncl: R3D;
//Посилання на об'єкт, в якому знаходиться вектор
WaveObject: TWaveObject;
//Посилання на силу, від якої поширюється вектор
Power: TPower;
//Кути розташування вектору (альфа і гамма за формулами)
alfaXY,alfaXZ: double;
//Поточна часова відмітка
t: extended;
//Посилання на попередній вектор (він на крок тому)
BeforVector: TVector;
//Швидкість розповсюдження хвилі за напрямком вектору
CalfaXY: extended;
//Часовий крок
dt: extended;
//Показник, що весь вектор розташовано в межах об'єкту
include: boolean;
//Показник, що весь вектор в повітрі
Air: boolean;
//Список векторів (завжди 4), які складають елемент сегменту
ListCellRoundVector: TList;
//Допоміжні параметри
BeforVectorGor, BeforVectorVert: TVector;
GlobalLine: double;
Kind: boolean;
JustInclude: boolean;
Item, ItemIncl: integer;
d1,d2: extended;
bd2: boolean;
NumberMirrow: integer;
ParentVector: Tvector;
FutureVector: TFutureVector;
constructor Create(AWaveObject: TWaveObject; APower: TPower; x,y,z: double;
AalfaXY,AalfaXZ: double; At, Adt: double); overload;
destructor Destroy; override;
//Метод перерахунку параметрів при переході вектору в інший об'єкт
procedure ChangeObject(AWaveObject: TWaveObject; AalfaXY,AalfaXZ: double);
//Розрахунок координат кінця вектору
procedure CalckPoint;
//Розрахунок координат точки перетину вектором чогось
procedure CalckInclude;
//Рух вектору на крок вперед
procedure Go(Adt: extended; bAddToList: boolean);
//Допоміжні методи для візуалізації
procedure AddToGlobalLine;
function Dlina: double;
procedure Draw;
procedure BildVectorAsFuture;
end; {TVector}

```

```

TCell=class
  List: TList; //Список векторів
  Power: TPower; //Посилання на силу-збудник
  //Посилання на об'єкт поверхні, до якої входить елемент
  Sfera: TGLLines;
  //Допоміжні поля
  GorLineTmp: double;
  pNapruGenCellAsParentTmp: pointer;
  FutureUpNapruGenCellItem: integer;
  FutureUpNapruGenSfera: pointer;
  constructor Create(APower: TPower);
  destructor Destroy; override;
  //Метод зв'язування вектору з елементом
  procedure AddVector(Vector: TVector);
  //Метод вилучення вектору з елемента (якщо вектор вийшов у повітря)
  procedure DeleteVector(Vector: TVector);
  //Метод візуалізації
  procedure Draw;
  //Перевірка елемента на цілісність (є всі 4 вектора)
  function full: boolean;
  //перевірка, що елемент цілком в одному об'єкті
  function AllInOwnObject: boolean;
  //Перевірка належності вектору до даного елемента
  function VectorInCell(Vector: TVector): boolean;
  //Методи інтерполяції
  function Interpolation: boolean;
  function InterpolationGor(Vector2,Vector1: TVector): TVector;
  function InterpolationVert(Vector2,Vector1: TVector): TVector;
  function InterpolationC(Vector2,Vector1: TVector): TVector;
  //Метод виклику перерахунку всіх параметрів елемента
  procedure Rebuild;
  //Допоміжні методи
  function fullAndAllLive: boolean;
  function GetFormFactor: integer;
  function HaveFutureVector: boolean;
  procedure BuildFutureVector;
end; {TCell}

```

```

TPower=Class
  //Візуалізація
  GLArrowLine: TGLCone;
  GLScene: TGLScene;
  D: double;
  SferaRed, SferaGreen,SferaBlue: TGLLines;
  Name: string; //Ім'я сили
  T: double; //Час початку дії
  //Посилання на об'єкт з глобальними полями та функціями
  Global: TGlobal;
  //Посилання на перший об'єкт прикладання сили
  WaveObjectFirst: TWaveObject;
  //Список векторів

```

```

ListVectorReal: TList;
//Список елементів сегментів (геометрія)
ListCell: TList;
//Список поверхень (сегментів)
ListRozrahunkSfera: TList;
//Параметри руху сили
first_dt: extended;
ParentPower: TPower;
MoveVz: double;
ListIndexListNaprigenSfera: TList;
V,U,x0: double;
constructor Create(AGlobal: TGlobal; AGLScene: TGLScene);
destructor Destroy; override;
//Методи завантаження-запису об'єкта сили
procedure LoadFromValueEditor(ValueEditor: TValueListEditor);
procedure WriteToValueEditor(ValueEditor: TValueListEditor);
//Метод створення об'єктів для опису поширення сили (викликається один раз при
утворенні сили)
procedure CreateWaveProcesses(Rusl: double);
//Методи роботи з множиною векторів
procedure AddVectorsToSfera;
function GetVector0for2(Vector: pointer; Var Count: integer): pointer;
function GetVector2for0(Vector: pointer; Var Count: integer): pointer;
function GetCellForVector(Vector: pointer; item: integer): pointer;
function AddNewGLArrowLine: TGLCone;
function CreateSfera: TGLLines;
procedure DrawNapruhen(Vetical: boolean);
procedure DrawAll;
//Розрахунок напружень в точці за координатами)
function GetGforXYZ(ListNaprigenSfera: TList; x,y,z: extended; zirrow: boolean; Var
G,H,ft: extended): boolean;
//пух сили
procedure Move;
//Метод додавання елементу до сегмента (формування поверхні)
function AddCellToNapruhenSfera(Cell: pointer): pointer;
//Методи розрахунку напружень на поверхнях сегментів
procedure AllLastNaprigenSferaCalck;
procedure AllSferaCalckNapruhen;
function SaveSfera: boolean;
//Метод розрахунку деформацій
procedure CakckDeformation(IndexRS: integer; x,y,z: extended; zirrow: boolean; Var List:
TList);
//Допоміжні методи
private
selfF: double;
function GetF: double;
procedure SetF(const Value: double);
procedure CalckNapruhenEx(ListNaprigenSfera: TList);
procedure CalckNapruhenExOnlyLast(ListNaprigenSfera: TList);
function GetIndexListNaprigenSfera(ListNaprigenSfera: TList): TIndexListNaprigenSfera;
function GetbNewMove: boolean;
published

```

```

public
property F: double read GetF write SetF;
property bNewMove: boolean read GetbNewMove;
end; {TPower}

```

TNapruGenCell=Class

```

S: double; //Площа елементу
//Кути положення елементу (альфа, гамма, бетта за формулами)
alfaXY,AlfaXZ,Betta: double;
//Посилання на об'єкт, в межах якого знаходиться елемент
WaveObject: TWaveObject;
//Координати середини елементу
Point: R3D;
//Маса елементу
m: double;
//Умовні розміри елементу
Dy,DyGor: extended;
//Геометричний елемент, який утворив даний
Cell: TCell;
//Посилання на об'єкт поверхні, до якої належить елемент
Host: TNapruGenSfera;
//За формулами - дзета
dzetta: extended;
//Показник, що елемент знаходиться на поверхні контакту об'єктів
bOutNapruGenGroup: boolean;
DeformCell: TDeformCell;
constructor Create(AHost: TNapruGenSfera; ACell: TCell);
destructor Destroy; override;
//Методи розрахунків напружень і деформацій елементу
function CalckGself: extended;
function CalckHself: extended;
function CalckU: extended;
function CalckUgor: extended;
function CalckP: extended;
function GetNumberMirrow: integer;
procedure Calck;
function GetPopravkaIzgib: extended;
end; {TNapruGenCell}

```

TNapruGenSfera=Class

```

ListNapruGenCell: TList; //Список елементів даної поверхні сегменту
t: extended; //Поточний час розрахунку
//Напруження за нульовим напрямком (для розв'язки системи диф. рівнянь)
G0: array [0..2] of extended;
dt: double; //Крок розрахунку
m0,S0: double; //Маса сегменту і площа його поверхні
//Допоміжні параметри
A,B: extended;
S: double;
du: extended;

```

```

Power: TPower;
RS: TRozrahunkSfera;
E0: double;
dY0: double;
GLPoints: TGLPoints;
VisiblePoints: boolean;
ListOutNapruGenGroup: TList;
LiveNapruGenCell: boolean;
WasSaveFile: boolean;
constructor Create(APower: TPower; ARS: TRozrahunkSfera; GlobalT,Adt: double; At:
extended);
destructor Destroy; override;
//Включення поверхні сегменту до загальної системи диф. рівнянь
procedure Calck;
//Допоміжні методи
function G01: extended;
function G02: extended;
procedure AddU(fG0: extended);
function AddNapruGenCell(ACell: TCell): TNapruGenCell;
procedure DeleteNapruGenCell(ACell: TCell);
procedure Draw(Vertical: boolean);
procedure SaveNapruGenCell;
function GetFileName: string;
procedure LoadNapruGenCell;
procedure ClearNapruGenSfera;
procedure AddNewMainNapruGenCell(NS: TNapruGenSfera; ItemCell: integer);
function GetOutPotencial: extended;
procedure SetbOutNapruGenGroup(Item: integer; Value: boolean);
end; {TNapruGenSfera}

```

ДОДАТОК К
СВІДОЦТВА ПРО АВТОРСЬКІ ПРАВА ТА АКТИ ПРО
ВПРОВАДЖЕННЯ

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 48583

Комп'ютерна програма "PONIL Record"

(вид, назва твору)

Автор(и) Савлук Віталій Євгенович, Курган Дмитро Миколайович, Кістол
Денис Вікторович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

04.04.2013



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 48583

Комп'ютерна програма "PONIL Record"

(вид, назва твору)

Автор(и) Савлук Віталій Євгенович, Курган Дмитро Миколайович, Кістол
Денис Вікторович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

04.04.2013



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 48584

Комп'ютерна програма "PONIL Change"

(вид, назва твору)

Автор(и) Савлук Віталій Євгенович, Курган Дмитро Миколайович, Кістол
Денис Вікторович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

04.04.2013



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня

Handwritten signature

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 48585

Комп'ютерна програма "PONIL Decoding"

(вид, назва твору)

Автор(и) Савлук Віталій Євгенович, Курган Дмитро Миколайович, Кістол
Денис Вікторович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

04.04.2013



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Заступник начальника

Департаменту колії та споруд

В. О. Яковлев

« 22 » 2017 р.



Акт

про впровадження результатів дисертаційної наукової роботи
«Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії
з швидкісним рухомим складом»

Даним актом підтверджується, що Департаментом колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» прийняті до використання результати дисертаційної роботи «Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом» виконаної докторантом Курганом Дмитром Миколайовичем у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна.

В дисертаційній роботі (2-й розділ) досліджено вплив взаємодії колії і рухомого складу в горизонтальній площині на обмеження швидкостей руху. Надана класифікація сполучень кривих та удосконалена методика визначення допустимих швидкостей руху в залежності від типу сполучення.

Результати цих досліджень увійшли в нормативний документ Департаменту колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» «Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії» (ЦП-0236), співавтором якого є Курган Д. М.

В. о. головного інженера

Департаменту колії та споруд

В. Б. Чемеринський

Заступник начальника

В. О. ЯКОВЛЄВ

2017 p.



про впровадження результатів дисертаційної наукової роботи
«Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії
з швидкісним рухомим складом»

Даним актом підтверджується, що Департаментом колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» прийняті до використання результати дисертаційної роботи «Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом» виконаної докторантом Курганом Дмитром Миколайовичем у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна.

В дисертаційній роботі, серед іншого, були досліджені методи розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії. Виконані варіантні розрахунки для сучасних конструкцій залізничної колії та рухомого складу, що дало змогу обґрунтувати температурні режими укладання та утримання безстикової колії за критеріями міцності та стійкості.

Результати цих досліджень увійшли в нормативний документ Департаменту колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» «Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України» (ЦП-0266), співавтором якого є Курган Д. М.

В. о. головного інженера

Департаменту колії та споруд

В. Б. Чемеринський

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Заступник начальника
Департаменту колії та споруд
В. О. Яковлєв
« 02 » лютого 2017 р.



Акт

про впровадження результатів дисертаційної наукової роботи
«Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії
з швидкісним рухомим складом»

Даним актом підтверджується, що Департаментом колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» прийняті до використання результати дисертаційної роботи «Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом» виконаної докторантом Курганом Дмитром Миколайовичем у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна.

В дисертаційній роботі був досліджений широкий спектр питань щодо системи методів, засобів і стратегій розрахунків залізничної колії з урахуванням особливостей, що мають місце при високих швидкостях руху. Це дало можливість отримати рекомендації щодо визначення комфортабельності їзди пасажирів, параметрів плану колії та інших показників, що визначають умови експлуатації при прискореному русі поїздів.

Результати цих досліджень увійшли в нормативний документ Департаменту колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» «Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України» (ЦП-0269), співавтором якого є Курган Д. М.

В. о. головного інженера

Департаменту колії та споруд

В. Б. Чемеринський

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор

Дніпропетровського національного

університету залізничного транспорту

імені академіка В. Лазаряна

Б. Є. Боднар

2017 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної наукової роботи
Кургана Дмитра Миколайовича «Методологія розрахунків залізничної
колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом»

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи «Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом», виконаної докторантом Курганом Дмитром Миколайовичем, використовуються в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна при викладанні дисциплін «Проектування залізничної колії» для магістрів, «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах» для бакалаврів і магістрів, а також при виконанні дипломних магістерських робіт за спеціалізаціями «Залізничні споруди та колійне господарство» і «Інфраструктура високошвидкісного залізничного транспорту» спеціальності 273 «Залізничні споруди».

Зав. кафедри

«Колія та колійне господарство»

канд. техн. наук, доцент

Арбузов М. А.

ДОДАТОК Л
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення і результати дисертації опубліковані

у виданнях, які індексовані в Index Copernicus і є фаховими:

1. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
2. Kurhan D. M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 2(56). – P. 136–145. doi: 10.15802/stp2015/42172
3. Курган Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 3 (57). – С. 118–128.
4. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 4 (58). – С. 99–109.
5. Курган М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96.
6. Kurhan D. Modeling Of Development Vertical Deformation Of Railway Track / D. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – № 1(61). – С. 100–108.
7. Курган Д. М. Оцінка безпеки руху за умови забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки / Д. М. Курган, В. О. Губар // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 65–72.

8. Курган Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі розповсюдження напружень в залізничній колії / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2016. – № 5(65). – С. 101–113.

9. Kurhan M. Forecasting of Passenger Traffic upon Implementation of High-Speed Running / M. Kurhan, D. Kurhan // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2017. – № 1(67). – P. 117–130.

у закордонних виданнях:

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

11. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83–96.

у монографії:

12. Курган М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган // –Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2016. – 283 с.

у фахових виданнях:

13. Раціоналізація перебудови кривих в плані при підвищенні швидкостей руху поїздів / В. В.Рибкін, М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 120–126.

14. Аналіз можливості застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів при організації швидкісного руху / А. П. Зубко, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 4. – С. 156–164.

15. Курган М. Б. Визначення допустимої швидкості руху поїздів з примусовим нахилом кузовів вагонів у кривих ділянках колії / М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 47–52.

16. 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 // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 41–44.

17. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 19. – С. 78–83.

18. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 20. – С. 233–239.

19. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 88–93.

20. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 124–128.

21. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Зб. наук. пр. ДЕТУТ «Транспортні системи і технології». – Київ, 2011. – Вип. 18. – С. 14–18.

22. Оцінка економічної ефективності усунення обмежень швидкості руху поїздів, пов'язаних із станом залізничної колії / А. А. Босов, М. Б. Курган, Д. М. Курган, С. Ю. Байдак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 106–115.

23. Бабенко А. І. Встановлення допустимої швидкості на складних ділянках плану залізниці з урахуванням комфортабельності їзди / А. І. Бабенко, Д. М. Курган, М. М. Черняков // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технічн. ун-ту трансп. «Транспортні системи і технології». – Київ, 2012. – Вип. 21. – С. 9–15.

24. 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 // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 1 (43). – С. 139–148.

25. 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 // Зб. наук. пр. – Донецьк : ДонІЗТ, 2012. – Вип. № 31. – С. 225–230.

26. Методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів на складних ділянках плану залізниці / М. Б. Курган, Д. М. Курган, Н. П. Хмилевська, С. Ю. Байдак // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – N 2 (50). – С. 83–94.

27. Курган Д. М. Діагностування і виправка положення залізничної колії колійними машинами / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // Українська залізниця. – 2016. – № 8(38). – С. 60–64.

Додаткові праці,

що є нормативними документами Укрзалізниці:

28. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. ЦП-0236 / М. Курган, А. Орловський, О. Патласов, В. Циганенко, Д. Курган. – Київ, 2011. – 52 с.

29. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України. ЦП-0266 / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. І. Белоусов, М. І. Карпов, Д. М. Курган, В. П. Шраменко, А. І. Бабенко, В. А. Штойко, І. О. Олійник, В. А. Лисак, К. Л. Каленик. – Київ, 2012. – 147 с.

30. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, О. М. Патласов, М. І. Карпов, В. П. Шраменко, О. І. Белорусов, В. О. Яковлев, В. М. Молчанов, К. В. Корноухова, М. Б. Курган, Д. М. Курган, В. М. Твердомед, Р. М. Йосифович, О. О. Сорока. – Київ, 2012. – 456 с.

у виданнях, що не є фаховими:

31. Курган Д. М. Адаптація енергетичного методу оцінки безпеки утримання безстикової колії за показником стискаючої сили для інженерних розрахунків / Д. М. Курган, Н. М. Лапшева // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – №. 6. – С. 41–46.

тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:

32. Корженевич И. П. Определение плавности и комфортабельности езды в кривых на участках скоростного движения / И. П. Корженевич, Н. Б. Курган, Д. Н. Курган // Материалы науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 431–439.

33. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко

// 69-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2009. – С. 160–161.

34. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // 70-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 180–181.

35. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 176–177.

36. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 177–178.

37. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // XIII Международная конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта». – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2012. – С. 27–28.

38. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології. Матеріали VI Міжнародної науково-практ. конф. – Київ : ДЕТУТ, 2013. – С. 96.

39. Курган, Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Проблеми взаємодії колії та рухомого

складу. Праці міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 73–74.

40. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність з урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. 74-та Міжнародна науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 256–257.

41. Курган Д. М. Особливості сприйняття залізничною колією динамічного навантаження при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 221–222.

42. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 222–223.

43. Курган М. Б. Розвиток нерівностей залізничної колії в зонах нерівнопружності на прикладі переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // 78-ма Міжнародна конф. «Транспортне будівництво та залізнична колія». – Харків, 2016. – С. 93–94.

44. Kurhan D. M. Perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // XIV міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2016. – С. 74–75.

45. Курган Д. М. Моделювання життєвого циклу системи на основі ентропії системи / Д. М. Курган // 6-та науково-практ. міжнародна конф. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – С. 100–101.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались і отримали схвалення на таких заходах:

69-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2009); 70-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2011); 71-ша Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2012); VI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, 2013); 74-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2014); 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2015); 78-ма Міжнародна конференція «Транспортне будівництво та залізнична колія» (Харків, 2016); XIV Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту» (Дніпро, 2016); 6-та науково-практична міжнародна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2017).

Дисертація в повному обсязі доповідалася на науковому семінарі кафедри колії та колійного господарства, міжкафедральному науковому семінарі кафедр колії та колійного господарства, проектування і будівництва доріг, мостів і тунелів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпро, 2017).