

*Створено модель для визначення процесів деформативної роботи залізничної колії для подальшого дослідження цих процесів на предмет встановлення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії. Досліджено особливості формування процесу деформативної роботи залізничної колії шляхом врахування розповсюдження об'ємних та поверхневих хвиль в конструкції систем верхньої та нижньої будов залізничної колії*

*Ключові слова: моделювання, життєвий цикл, деформативність залізничної колії, розповсюдження хвиль, надійність колії, функціональна безпека колії*

*Создана модель для определения процессов деформированной работы железнодорожного пути для дальнейшего исследования этих процессов на предмет установления оценочных условий функциональной безопасности железнодорожного пути. Исследованы особенности формирования процесса деформационной работы железнодорожного пути путем учета распространения объемных и поверхностных волн в конструкции систем верхней и нижней строений железнодорожного пути*

*Ключевые слова: моделирование, жизненный цикл, деформативность железнодорожного пути, распространение волн, надежность пути, функциональная безопасность пути*

УДК 625.1"401.4"-047.58

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59874

# МОДЕЛЮВАННЯ З МЕТОЮ ВСТАНОВЛЕННЯ ОЦІНОЧНИХ УМОВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

І. О. Бондаренко

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра «Путь и путевое хозяйство»

Днепропетровский национальный

университет железнодорожного транспорта  
ул. Лазаряна, 2,

г. Днепропетровск, Украина, 49005

E-mail: irina\_bondarenko@ua.fm

## 1. Вступ

Існують дві характеристики, які характеризують стан будь-якого об'єкту: це надійність та функціональна безпека. Надійність колії характеризує її здатність забезпечити безперервний пропуск поїздів з установленною швидкістю у заданих умовах експлуатації, поточного утримання та ремонтів. Функціональна безпека залізничної колії характеризує її здатність забезпечувати безперебійний пропуск поїздів безпечно, тобто без виникнення небезпечний відмов.

Кожна ділянка колії характеризується своїми експлуатаційними параметрами. За весь час експлуатації конструкція рейко-шпальної решітки може бути укладена на декількох ділянках та її загальний термін служби становить суму термінів служби на кожній з цих ділянок. Баластний шар не має терміну служби, так як він постійно досипається. Земляне полотно побудовано під експлуатаційні умови на термін приблизно півтора столітньої давнини та експлуатується без реконструкції під впливом сучасних навантажень. Рухомий склад, що обертається по колії, має різні стани починаючи з нового до граничного. Отже за свій життєвий цикл, що обчислюється від початку експлуатації (з урахуванням її відновлення після ремонтів) до переходу в стан, при якому експлуатація неприпустима, рейко-шпальна решітка по умовам міцності та стійкості в подовжньому і поперечному напрямках повинна забезпечувати безпечний рух залізничного рухомого складу при будь яких кліматичних умовах.

Основна проблема дослідження процесів, що впливають на функціональну безпеку колії, полягає в тому, що необхідно розглядати не момент часу, при якому враховані всі несприятливі умови для окремо розглянутої площини (відповідно існуючим нормативним методикам), а динамічний процес зміни стану експлуатаційної надійності залізничної колії. Цей процес повинен коректно враховувати комплексну оцінку положення рейкових ниток в плані і профілі, наявність зносів рейок та коліс, що впливають на форму та площу контактної взаємодії, пружні властивості колії, при відстеженні горизонтального і вертикального переміщень колеса щодо рейки і проміжок часу, протягом якого відбуваються ці переміщення. Окрім зазначеного необхідно враховувати, що навіть в ідеальній прямій ділянці колії колісна пара рухається по синусоїді, довжина хвилі якої залежить від конусності та радіусу колеса і ширини колії.

Тому необхідно питання про оцінку впливу дії рухомого складу на колію розглядати як динамічний процес, критерії граничних станів якого обумовлені на підставі існуючих нормативів співвіднесених зі станами надійності, а на їх основі розробити критерії по безпеці протягом всього життєвого циклу експлуатації.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Роботи з вивчення динамічних процесів ведуться в різноманітних напрямках. Теоретичну частину, за-

звичай, розробляють науковці фізико-математичного напрямку, а науковці технічного напрямку поширюють розробки з врахуванням особливостей цього процесу. Так в роботі [1], розроблено алгоритм побудови хвильових полів, які генеруються рухомими осцилюючими навантаженнями в гетерогенному шаруватому півпросторі і пакеті шарів. Виконано натурний експеримент реєстрації хвильових полів, які генеруються в основі магістралі поїзного навантаження, що підтвердив висновки теоретичних досліджень. Але складність полягає в тому, що збуджувані хвильові поля несуть в собі інформацію, з одного боку, про інтегральні параметри рухомого складу, а з іншого – про параметри баластної призми і ґрунтового середовища, тому вони дають змогу аналізувати характеристики на основі порівняння, тобто виконувати якісний аналіз.

В роботі [2] досліджується стійкість коливань двомасового осцилятора, який рівномірно рухається по балці моделі Бернуллі-Ейлера, що лежить в в'язко-пружному півпросторі. Недоліком є те, що вводиться еквівалентна жорсткість півпростору і завдання зводиться до вирішення задачі про коливання балки на одновимірній основі, оскільки деформативні характеристики колії є дуже слабким місцем. Хоча принципово важлива відмінність полягає в тому, що еквівалентна жорсткість півпростору не є константою, а залежить від частоти і хвильового числа в балці.

Дуже багато досліджень присвячені впливу динамічних коливань колії на коливання ґрунтів та споруд, що знаходяться поруч. Вони, зазвичай, базуються на експериментах. Прикладом з визначення несучої здатності ґрунтів, може бути робота [3], де виконані польові, лабораторні та теоретичні дослідження. У роботі виконані розрахунки, на основі яких розроблена методика розрахунку та прогнозування несучої здатності земляного полотна, відсипаного барханними пісками, що сприймають вібродинамічне навантаження. Також прикладом робіт такого напрямку є робота [4], де розглянуто динамічні навантаження протягом сезонів та встановлено різницю характеристик вказаного процесу при різних станах ґрунтів. Перевагою таких робіт є різноманітні дослідження поведінки конкретних ґрунтів, але основним недоліком є неможливість розповсюдження отриманих результатів на основі з інших ґрунтів, інші умови експлуатації та інші кліматичні зони.

У зв'язку з постійною потребою збільшення ваги вантажних поїздів, швидкостей пасажирських поїздів та пропускної спроможності залізничних ліній, а також відсутності вільного простору в населених пунктах, підвищення інтенсивності залізничного транспортного шуму і вібрації може стати спільною екологічною проблемою в майбутньому. Тому дуже багато досліджень виконується в цьому напрямку. Так, в роботі [5] розглянуто цю проблему в рамках міських хорватських трамвайних та залізничних ліній. В роботі [6] описано досягнення щодо зниження шуму та вібрації, що виконуються за програмою в Німеччині до 2020 р. В роботі [7] описано досвід гонконгських залізничних мереж, протяжність яких сягає 211 км щодо планування та контролю за шумом у великих містах. Ці роботи не дають удосконалення для розрахунку поширення коливань від дії рухомого складу, але значно розширюють інформацію стосовно цих процесів та їх вплив на оточу-

юче середовище. Крім того, на їх підставі формуються критерії шуму та віброзахисту.

Проблему забезпечення надійної роботи залізничної колії з точки зору обробки існуючої інформації та прогнозування на її підставі імовірності ризиків розглянуто в роботі [8]. Запропоновано підвищення коефіцієнта готовності колії за рахунок зниження ризиків, що ґрунтується на підвищенні обізнаності та підготовленості до подій. Але враховано всі майбутні ризиковані події тільки за спостереженням виходу елементів верхньої будови колії та зміни експлуатаційних умов. Для прогнозування необхідно враховувати поведінку й нижньої будови колії, адже вона має найбільший термін служби, ніж всі елементи залізничної колії. Отже, прогнозування буде мати похибки, якщо не забезпечувати однаковий стан земляного полотна при подальшій експлуатації, але напрям сучасно розширює поняття працездатного стану колії.

При вивченні коливань системи «екіпаж-колія» сформовано два напрями досліджень: вивчення коливань рухомого складу та вивчення коливань колії. Обидва напрями вивчають коливання дослідного об'єкта за умови, що партнер по взаємодії задається певним збуджуючим коливанням. Обидва напрями не враховують відклик партнера від взаємодії. Дослідження коливань з конструкцій верхньої та нижньої будови колії зводяться до вивчення коливань рейки при певних впливах рухомого складу та певних характеристиках підрейкової, а іноді підшпальної основи. Результатами таких досліджень є напружено-деформований стан, що характеризує міцність та витривалість. Коливання рухомого складу вивчаються більш широко. Але при їх дослідженні коливання системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії подають як набір збуджуючих коливань. Функції, що описують ці коливання, навіть не мають чіткої залежності від характеристик елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії.

Існує декілька основних теоретичних моделей для дослідження зазначених проблем: балка на півпросторі, балка на двохшаровій основі, конструкція колії за канонами методу скінченних або граничних елементів. Так, в роботі [9] розглянуто піддатливість залізничних ліній за допомогою моделі балки на півпросторі та за допомогою методу скінченних елементів. У роботі [10] порівняно розрахунки вібрацій у метрополітені, виконаних для моделі, що описана за методом граничних елементів, та за запропонованим методом «труба в трубі». У запропонованому методі тунель стіни та земля, що оточує її, моделюються у вигляді двох концентричних труб з використанням засад теорії пружності континууму. Роботи [11, 12] є продовженням напрямку твердотільних досліджень, що розвинуті завдяки удосконаленню характеристик, отриманих за експериментами та використанням методу скінченних елементів. В роботі науковців університету Лафборо (Великобританія) [13] зібрано аналіз отриманих емпіричних даних та надано оцінку моделей, що застосовуються при розрахунку коливань в основі колії від впливу рухомого складу, та рекомендації щодо подальшого коригування моделей.

Типові експериментальні дослідження зводяться до визначення станів рухомого складу та колії в кон-

кретних перетинах, та відповідності цих станів нормативам.

Вивчення взаємодії рухомого складу та колії за допомогою тензометричних пар дуже суттєво розширює можливість оцінки взаємодії колії та рухомого складу. Так в роботах [14, 15] наведено результати оцінки стану колії геометрично-силовим методом. Показано, що частина сходонебезпечних ділянок колії не вибираються традиційними способами, які базуються на оцінці геометричних параметрів колії. За проведенням аналізом перетини колії з низьким коефіцієнтом стійкості проти сходу з рейок запропоновано розбити на три групи. Результати цих робіт суттєво уточнюють небезпечні співвідношення параметрів колії та рухомого складу та звужують коло досліджень.

Відсутність нормативних критеріїв оцінки стану колії за показниками надійності та функціональної безпеки спонукає до необхідності створення нових моделей, завдяки яким можливо дослідити динамічний процес взаємодії залізничної колії та рухомого складу.

### 3. Ціль та задачі дослідження

Проведенні дослідження ставили за мету створити модель для визначення процесів деформативної роботи залізничної колії для подальшого дослідження цих процесів на предмет встановлення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалася наступна задача: описати особливості формування процесу деформативної роботи залізничної колії шляхом врахування розповсюдження об'ємних та поверхневих хвиль в конструкції систем верхньої та нижньої будов залізничної колії.

### 4. Матеріали та методи дослідження впливу дії рухомого складу на деформативну роботу залізничної колії

#### 4. 1. Основні теоретичні положення і принципи, щодо опису особливостей деформативної роботи

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

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

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

- елементи системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії представляє собою систему суцільних тіл, що мають властивість властивістю дисипації;

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

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

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

#### 4. 2. Формування вихідних даних щодо опису особливостей деформативної роботи

Завжди необхідно правильно сформулювати задачу та визначити вхідні дані, отже вони впливають на результат. Тож до вхідних даних належать:

- тип рухомого складу, його швидкість та навантаження, що формують значення та місця впливу діючої сили;

- стан рейки та колеса, що формують площадку контакту та частоту імпульсу зовнішньої сили, яка характеризує амплітуду коливань;

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

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

#### 4. 3. Моделювання життєвого циклу деформативної роботи елементів залізничної колії

При моделюванні залізнична колія розглядається як просторова система об'єктів, що уявляє собою зборку елементів конструкції колії, які характеризуються геометричними розмірами і фізичними властивостями, відповідно до нормативної літератури. Вплив рухомого складу описується даними, що містять інформацію про його величину, місце та час дії. Розповсюдження хвильового процесу описано рівнянням коливань від дії зовнішньої сили для певної точки:

$$s(x, y, z, t) = A e^{-\frac{bt}{2m}} \times \sin \left( t \sqrt{\omega_0^2 - \frac{b}{2m}} + \alpha \right) e^{\beta z} + B \sin(\omega t + \beta), \quad (1)$$

де  $A, B$  – амплітуди внутрішніх відповідно власних та вимушених коливань;  $b$  – коефіцієнт опору середовища;  $m$  – маси, що задіяні в процесі деформування на кожний момент часу;  $\omega, \omega_0$  – частота впливу відповідно, зовнішнього впливу та власна частота системи конструкцій верхньої та нижньої будов, на певний момент часу;  $\vartheta$  – величина згасання власних коливань за глибиною;  $\alpha, \beta$  – фази відповідності зовнішніх та внутрішніх відповідно власних та вимушених коливань.

Таким чином, постановка динамічної задачі по визначенню процесу деформативної роботи залізнич-

ної колії зводиться до того, що в заданій області  $\Omega$  необхідно знайти поля напружень  $\sigma_{ij}$ , деформацій  $\epsilon_{ij}$  переміщень  $u_i$  та щільності  $\rho_i$  що задовольняють рівнянням в будь-який момент часу  $t$  :

– руху:

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

– граничним умовам:

$$\sigma_{ij} n_j = \tau_i, \quad (3)$$

– залежностям Гуку:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \lambda \Theta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}, \\ \Theta &= j_i(\epsilon_{ij}) = \text{div} u; \end{aligned} \quad (4)$$

– залежностям Коші:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}); \quad (5)$$

– збереженню маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div} \bar{v} = 0. \quad (6)$$

Одиничність рішення досягається шляхом формування початкових:

$$\begin{cases} u|_{t=0} = \phi_0(x,y,z), \\ \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = \phi_1(x,y,z); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\rho k s_x}{\mu V_i} + \frac{\rho h \partial s_x}{\mu \partial t} - \rho X g + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\rho k s_y}{\mu V_i} + \frac{\rho h \partial s_y}{\mu \partial t} - \rho Y g + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\rho k s_z}{\mu V_i} + \frac{\rho h \partial s_z}{\mu \partial t} - \rho Z g + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \\ \left( \lambda \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) Z = \tau_z, \end{cases} \quad (9)$$

та граничних умов:

$$u|_s = f(x,y,z,t). \quad (8)$$

По-перше, рішення диференціального рівняння однозначно визначаються початковими умовами. Так, якщо розглядається коливання будь-якої точки певної ділянки з системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії, то початковими умовами є відсутність впливу рухомого складу. По-друге, при безперервній зміні початкових даних відповідне рішення змінюється безперервно. Це означає, що при появі впливу рухомого складу, який буде спочатку наближуватись, а потім віддалятися від будь-якої точки ділянки зазначеної системи, будуть змінюватись початкові дані щодо впливу рухомого складу від її повної відсутності до максимальних значень і навпаки. За цими даними будуть змінюватись характеристики напружено-деформованого стану точки, які призводять до зміни деформативного процесу на ділянці. По-третє, значення функції в будь-якій точці ділянки системи залежить не від всієї сукупності початкових даних, а тільки від початкових даних вздовж частини початкової поверхні впливу, яка вирізається з загальної поверхні впливу характеристиками, що виходять з точки. Тобто, зміни характеристик точки ділянки залежать не від всієї поверхні, по якій контактують колеса з рейкою або елементи конструкції між собою,

а тільки від тієї частини, що на даний час передала вплив збудника коливань на точку.

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

### 5. Результати досліджень створення моделювання для дослідження деформативної роботи залізничної колії

Рішення рівнянь за (2)–(8), приводять до системи рівнянь щодо визначення складових переміщення  $u_x, u_y, u_z$ :

де  $k$  – жорсткість;  $h$  – коефіцієнт опору середовища;  $X_g, Y_g, Z_g$  – проекції масової сили на відповідні напрямки;  $\lambda, \mu, \nu$  – постійні Ляме;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Всі рівняння належать до неоднорідних диференціальних рівнянь гіперболічного типу другого порядку з частковими похідними. Вони мають одну послідовність розв'язання, тому далі наведено цю послідовність, де складова за напрямком, відносно якої йде розв'язання, позначена як  $j$ :

$$\left( \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \right) \mu + \left( K g - \frac{k}{V_i} s_j - \frac{h}{V_i} \frac{\partial s_j}{\partial t} \right) \rho = \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}. \quad (10)$$

Загальне рішення визначається як:

$$\begin{aligned} u_j &= \int_0^t v_j(x,y,z,t,\tau) d\tau, \\ \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} &= \int_0^t \frac{\partial^2 v_j}{\partial t^2} dt + \left( K g - \frac{k}{V_i} s_j - \frac{h}{V_i} \frac{\partial s_j}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

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

залежності незалежних змінних визначаються з рівнянь:

$$\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + k_1^2 T(t) = 0,$$



$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + k_2^2 X(x) = 0, \tag{12}$$

$$\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + k_4^2 Y(y) = 0,$$

$$\frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + k_5^2 Z(z) = 0.$$

Остаточо:

$$v_j = \frac{\sqrt{\rho}}{2\sqrt{\mu k_1}} (K_g + K_{U sj} - K_{T sjt}) \sin\left(\frac{\sqrt{\mu k_1}(t - \tau)}{\sqrt{\rho}}\right),$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{\pi^2(n^2 + l^2)}{C_t^2 t^2} + \frac{\pi^2 m^2}{C_t^2 t^2}}, \tag{13}$$

$$u_j = \int_0^t v_j d\tau.$$

Далі в заданій області  $\Omega$  визначаються поля напружень  $\sigma_{ij}$ , деформацій  $\epsilon_{ij}$  та щільності  $\rho_i$  на момент часу  $t$  для розглянутого інтервалу  $\Delta t$ .

Порівняно значення напружень в кромці підшви та головці рейки від впливу локомотиву ЧС8 при русі 155 км/год. на колію з рейками типу УІС60, скріпленням типу КПП, щебеневим баластним шаром товщиною 0,4 м та земляним полотном відсипаним з суглинку отриманими за різними методиками та експериментом. За результатами існуючих «Правил розрахунку колії на міцність і стійкість» їх величини відповідно становлять 102,42 та 106,84 МПа; за розрахунками методом скінчених елементів – 153,32 та 145,7 МПа; за запропонованим методом – 159,47 та 145,9 МПа; за експериментом – 163,3 та 146,1 МПа.

При моделюванні запропонованим методом необхідно врахувати наступні особливості:

- довжина розглянутої ділянки повинна бути не менше ніж сума подвоєного добутку швидкості розповсюдження хвилі за напрямком для найбільш твердого матеріалу і часу дії сили в одному перетині та довжині ділянки на якій розглядається рух. Так для розгляду одного перетину колії довжина ділянки становить 25 м;

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

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

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

Такий детальний опис процесу деформативності колії від дії рухомого складу дає можливість досліджувати зміни, що відбуваються у колії з урахуванням траєкторії руху та характеристик екіпажа і станів самої колії. Та на

основі цих досліджень виявляти випадки порушення будь-яких умов безпечного пропуску поїздів по колії.

### 6. Обговорення результатів дослідження щодо формування оціночних умов взаємодії рейки та колеса при русі

Формування оціночних умов необхідно виконати на засадах теорії надійності, так як функціональна безпека є її складовою. Частково це було зроблено за рахунок аналізу існуючих нормативних документів [16]. Але додатково необхідно провести дослідження щодо визначення умов при яких порушуються умови безпеки. Критеріями можуть виступати врахування трьох факторів: можливості сходу колісної пари з рейок, стійкості в подовжньому та поперечному напрямку залізничної колії.

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

Використання методики розрахунку параметрів деформативності колії зі застосуванням теорії розповсюдження хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу можна визначити при яких геометричних, силових та швидкісних параметрах рухомого складу будуть мати місце отримані співвідношення, що характеризують подовжню стійкість залізничної колії. Отже визначення таких співвідношень та порівняння за повною методикою визначення подовжньої стійкості колії [17] надає межі для формування нормативної бази з надійності та функціональної безпеки колії з урахуванням її деформативних особливостей.

Окрім стійкості в подовжньому напрямку рейкової колії необхідно враховувати поперечну стійкість залізничної колії [18]. Вона залежить від діючих на неї поперечних сил та від опору рейко-шпальної решітки поперечному здвигу. Останній залежить від характеристик і стану поверхонь підрейкових опор та середовища в якому вони знаходяться, а також від величини й характеру силового впливу на опори.

Оскільки з підвищенням швидкостей руху поїздів збільшуються частоти та амплітуди коливань баластного шару, це призводить до зниження опору баластного матеріалу здвигу. Для недопущення залишкових здвигів рейко-шпальної решітки встановлено наступні вимоги до допустимих значень відношень сил:

$$\alpha_1 = \frac{Q_{\Gamma-\max}}{Q_B} \leq |\alpha_1|, \tag{14}$$

де  $Q_{\Gamma-\max}$  – найбільше горизонтальне бокове навантаження від рейки на шпалу;  $Q_B$  – середнє значення вертикального навантаження від рейки на шпалу.

Допустимі значення відношень для різних швидкостей руху поїздів становлять:

- 1)  $V \leq 120$  км/год.  $|\alpha_1| = 1,4$ ;
- 2)  $120 < V \leq 170$  км/год.  $|\alpha_1| = 1,1$ ;
- 3)  $170 < V \leq 200$  км/год.  $|\alpha_1| = 1,05$ .

Отже, визначення таких співвідношень за наведеною методикою надає межі для формування нормативної бази з надійності колії з урахуванням її деформативних особливостей. Та за умови використання методики розрахунку параметрів деформативності колії зі застосуванням теорії розповсюдження хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу можна визначити, при яких геометричних, силових та швидкісних параметрах рухомого складу будуть мати місце отримані співвідношення, що характеризують поперечну стійкість залізничної колії.

Цим зазначеним вище питанням і буде присвячено подальше дослідження за розробленою моделлю щодо формування оціночних критеріїв з надійності та функціональної безпеки залізничної колії.

## 7. Висновки

Проведеними дослідженнями щодо створення моделі для визначення процесів деформативної роботи залізничної колії від впливу рухомого складу описано особливості формування процесу деформативної роботи залізничної колії. Основною особливістю цього опису є розгляд процесу зміни напружено-деформованого стану колії за певний проміжок часу. Тобто розглядається динамічний процес, при якому відбуваються переміщення колії від впливу горизонтальних і вертикальних переміщень коліс щодо рейки за проміжок часу. Встановлено розміри досліджуваної ділянки та відстані розташування сил, що необхідно враховувати при моделюванні за допомогою методу розповсюдженнь об'ємних та поверхневих хвиль. На основі розробленої моделі та сформованих вимог щодо оціночних умов з функціональної безпеки колії будуть проведені дослідження щодо визначення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії.

## Література

1. Суворова, Т. В. К расчету волнового поля, возбуждаемого встречными осциллирующими нагрузками в гетерогенном полупространстве [Текст]: сб. тр. Всер. н.-т. конф. / Т. В. Суворова, С. А. Усошин // Транспорт-201, 2011. – С. 37.
2. Веричев, С. Н. Математические методы исследования устойчивости объекта, движущегося по упругой направляющей [Текст] / С. Н. Веричев // Вестник нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2008. – № 4. – С. 117–121.
3. Корнилов, С. Н. Результаты экспериментального изучения прочностных характеристик барханных песков, слагающих железнодорожное земляное полотно [Текст] / С. Н. Корнилов. Ш. Ш. Абдукамилов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2015. – № 1. – С. 105–110.
4. Ling, X.-Zh. Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai-Tibet railway in China [Text] / X.-Zh. Ling, S.-J. Chen, Zh.-Y. Zhu, F. Zhang, L.-N. Wang, Z.-Y. Zou // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 60, Issue 1. – P. 75–83. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.08.005
5. Lakušić, S. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas [Text] / S. Lakušić, M. Ahac // Technical Gazette. – 2012. – Vol. 19, Issue 2. – P. 427–435.
6. Schulte-Werning, B. Advancements in Noise and Vibration Abatement to Support the Noise Reduction Strategy of Deutsche Bahn [Text] / B. Schulte-Werning, B. Asmussen, W. Behr et al. // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2012 – Vol. 118. – P. 9–16. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8\_2
7. Lee, B. Planning and Controlling Railway Noise in a Metropolis: Jur Practical Experience [Text] / B. Lee, W. Chau, J. Lam, M. Yeung // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2012 – Vol. 118 – P. 17–23. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8\_3
8. Касимов, Б. Р. Методика прогнозирования состояния путевой безопасности [Текст] / Б. Р. Касимов // Промышленный транспорт Казахстана. – 2014. – Вып. 1. – С. 19–23.
9. Auersch, L. The Influence of the Soil on Track Dynamics and Ground-Borne Vibration [Text] / L. Auersch // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2008. – Vol. 99. – P. 122–128. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9\_17
10. Hussein, M. F. M. Using the PiP Model for Fast Calculation of Vibration from a Railway Tunnel in a Multi-layered Half-Space [Text] / M. F. M. Hussein, H. E. M. Hunt, L. Rikse, S. Gupta, G. Degrande, J. P. Talbot et al. // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2008. – Vol. 99. – P. 136–142. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9\_19
11. Lombaert, G. Ground-Borne Vibration due to Railway Traffic: A Review of Excitation Mechanisms, Prediction Methods and Mitigation Measures [Text] / G. Lombaert, G. Degrande, S. Francois, D. J. Thompson // Noise and Vibration Mitigation for Rail Trans. Sys. – 2008. – Vol. 126. – P. 253–287. doi: 10.1007/978-3-662-44832-8\_33
12. Thompson, D. Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems [Text] / D. Thompson // 21st International Congress on Sound and Vibration. – Beijing, China, – 2014 – P. 1–16.
13. Avillez, J. Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration: a review [Text] / J. Avillez, M. Frost, S. Cawser, C. Skinner, A. El-Hamalawi, P. Shields // ASME 2012 Noise Control and Acoustics Division Conference, 2012. – P. 381–392. doi: 10.1115/ncad2012-1083
14. Коссов, В. С. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути [Текст] / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 5 (47). – С. 97–104.
15. Краснов, О. Г. Результаты оценки состояния пути диагностическим поездом геометрически-силовым методом [Текст] / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, А. В. Ефименко, Т. Ю. Некрасова // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – Вип. 9. – С. 20–24.

16. Бондаренко, І. О. Формування оціночних умов життєвого циклу деформативної роботи залізничної колії [Текст] / І. О. Бондаренко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2015. – Вип. 3 (57). – С. 107–117.
17. Альбрехт, В. Г. Бесстыковой путь и длинные рельсы [Текст] / В. Г. Альбрехт, В. Н. Лященко, С. П. Першин, В. Я. Шульга. – М.: Транспорт, 1963. – 214 с.
18. Вериго, М. Ф. Установление ном боковых динамических нагрузок подвижного состава по условию устойчивости пути поперечном сдвигу [Текст] / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский // Труды ЦНИИИ МПС. – 1962. – № 248. – С. 210–302.

*Наведені методика та результати експериментальних досліджень хвильового навантаження на моделі верхньої будівлі морських гідротехнічних споруд. Отримана розрахункова залежність для визначення рівнодіючої вертикальної складової хвильового навантаження на верхню будівлю наскрізного типу у діапазоні крутизни хвилі, дослідженої у експерименті. Наведені приклади розрахунку навантаження, що досліджувалося*

*Ключові слова: гідротехнічні споруди наскрізного типу; верхня будівля; вертикальна складова хвильового навантаження*

*Изложены методика и результаты экспериментальных исследований волновой нагрузки на модели верхнего строения морских гидротехнических сооружений. Получена расчетная зависимость для определения равнодействующей вертикальной составляющей волновой нагрузки на верхнее строение сооружений сквозного типа в диапазоне крутизны волны, исследованной в эксперименте. Приведены примеры расчета искомой нагрузки*

*Ключевые слова: гидротехническое сооружение сквозного типа; верхнее строение; вертикальная составляющая волновой нагрузки*

УДК 627.51

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59889

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

С. И. Рогачко

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра морских и речных портов,  
шельфовых сооружений, водных  
путей и их технической эксплуатации

Одесский национальный морской университет  
ул. Мечникова, 42, г. Одесса, Украина, 65029

E-mail: rostasice@ukr.net

И. Н. Панова

Кафедра энергетического  
и водохозяйственного строительства

Одесская государственная  
академия строительства и архитектуры  
ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, Украина, 65029

E-mail: panirina@meta.ua

## 1. Введение

Одним из направлений развития Украины, как свободного европейского государства, является достижение энергетической независимости. В связи с этим освоение новых месторождений нефти и газа и, соответственно, строительство морских гидротехнических сооружений на континентальном шельфе, является приоритетным направлением в экономике страны. Кроме того, европейская интеграция нашего государства, предполагающая расширение международных и внешнеэкономических связей, требует усовершенствования и реконструкции существующих портов, а также строительства глубоководных и рейдовых причалов для обслуживания крупнотоннажных судов. Находясь на незащищенных акваториях, такие сооружения в полной мере испытывают силовое воздействие волновых нагрузок. Существенным внешним фактором, влияющим на верхнее строение перечисленных гидротехни-

ческих сооружений, является вертикальная составляющая волновой нагрузки, которая в настоящее время изучена недостаточно.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В действующих нормативных документах по определению нагрузок на гидротехнические сооружения [1] отсутствуют рекомендации по определению волновой нагрузки на верхнее строение морских гидротехнических сооружений сквозного типа, к которым относятся причалы эстакадного типа, морские нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения (МНГС) (рис. 1) и морские эстакады. Ввиду недостаточной изученности воздействия волн на верхнее строение перечисленных сооружений, отметка линии кордона рейдовых причалов назначается конструктивно, а отметка нижней ча-