

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.1"401.4"-047.58

І. О. БОНДАРЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Наукова стаття передбачає визначення основних фізико-конструктивних умов при моделюванні життєвого циклу роботи елементів залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності як основи створення нормативної бази роботи колії за умов забезпечення надійності залізниць. **Методика.** Для досягнення мети використано засади теорії пружності та розповсюдження хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу. **Результати.** Встановлено основні фізико-конструктивні умови, на основі яких необхідно проводити моделювання життєвого циклу роботи елементів залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності. Сформульовано основні фізико-конструктивні засади складання розрахункових схем елементів залізничної колії для оцінки процесу деформативної роботи колії. Доведено коректність та можливість рішення поставленої задачі. **Наукова новизна.** Дослідження питань із надійності колії мотивує розробку нових моделей, що дають можливість розглядати її протягом деякого напрацювання. Існує необхідність визначення основних фізико-конструктивних умов для складання розрахункових схем, на основі яких можливі оцінка та прогнозування зміни станів колії у процесі її експлуатації. У роботі запропоновано основні фізико-конструктивні засади складання розрахункових схем елементів залізничної колії, при яких виконується принцип Гюйгенса. Зазначений принцип може виконуватись тільки при розгляді чотирьохмірного простору: зміни об'єму в часі. **Практична значимість.** Аналітичні моделі, що застосовані при визначенні параметрів міцності та стійкості колії, повністю задовольняють поставленим задачам, але не можуть бути застосовані для визначення параметрів надійності колії. Одним із головних факторів неможливості застосування цих моделей є квазидинамічний підхід. Тому, зазвичай, отримують та досліджують не сам динамічний процес роботи залізничної колії, а його наслідки. Окрім того, такі моделі відносяться до плоских, що також додає певних складнощів до порівняння результатів із експериментом, так як нелегко в об'ємному процесі виділити вплив в його обмежених частинах. Застосування чисельних методів розширює можливості, але також унеможливує розгляд самого динамічного процесу, бо неможливо ввести процеси, що обумовлюють реакцію на навантаження. Тому запропоновані основні фізико-конструктивні підходи при моделюванні дають можливість розглядати безпосередньо динамічний процес, локалізований як у часі, так і в просторі.

Ключові слова: моделювання; життєвий цикл; деформативність колії; залишкові деформації; працездатність; хвильове розповсюдження; напружено-деформований стан колії; надійність колії; переміщення колії

Введення

Надійність системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії – це властивість цієї системи зберігати у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах та умовах експлуатації при встановленій системі технічного обслуговування.

Необхідними функціями в цьому випадку є пропуск рухомого складу зі встановленими швидкостями руху.

Умови експлуатації встановлюються на основі [8], за якими виділено вісім категорій колії

з певними значеннями вантажонапруженості ділянки та максимально встановлених швидкостях вантажних і пасажирських поїздів.

Режими експлуатації визначаються техніко-економічними розрахунками на основі [9]. При цьому встановлюють міжремонтні схеми, за якими система конструкцій верхньої та нижньої будов колії повинна бути приведена в працездатний стан.

Технічне обслуговування виконують безперервно впродовж року на всій протяжності колії з метою нагляду для забезпечення її працездатності. Основним принципом організації й виконання поточного утримання колії є запо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

бігання появі несправностей, а також усунення їх на початковій стадії з одночасною ліквідацією причин, що їх викликали. Поточне утримання встановлюється на базі [5] в обсязі, передбаченому розрахунковими експлуатаційними витратами, відповідними за терміном служби конструкції верхньої будови колії.

Отже, дослідження питань надійності системи конструкцій верхньої та нижньої будов зводиться до визначення параметрів, що впливають на перехід системи зі стану в стан.

За теорією надійності існують п'ять станів: справний, несправний, працездатний, непрацездатний та граничний. Але в нормативно-технічних документах щодо системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії не прописано, які технічні стани системи відповідають зазначеним станам надійності.

Питання класифікації технічних станів системи ускладнюються і тим, що під час виконання посиленних капітальних або капітальних ремонтів для IV...VII категорій колії [9] передбачається укладання старопридатних матеріалів. Але основні положення надійної роботи системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії були розроблені залізницями, які не застосовують старопридатні елементи та конструкції верхніх будов та привели відповідно до сучасних експлуатаційних умов конструкцію нижньої будови колії. Тому, відповідно до класифікацій за станами надійності, зазначені категорії колій відносяться до «небезпечних» [4], навіть після виконання ремонтів.

Отже, враховуючи особливості використання різноманітних (нових, нових та старопридатних і старопридатних) елементів під час виконання ремонтів колії, необхідно встановити їх параметри не тільки за станами надійності, а й відповідно до вимог функціональної безпеки.

Таким чином надійність системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії і її функціональна безпека пов'язані між собою, та повинні базуватись на одних теоретичних засадах. Тому, по-перше, необхідно дослідити, які параметри впливають на зміну стану надійності системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії та які значення цих параметрів відповідають вимогам за станами надійності.

Для того щоб встановити параметри, що

впливають на зміну технічних станів системи конструкцій верхньої та нижньої будов, необхідно розглянути роботу цієї системи в часі.

Оскільки параметри розрахунків міцності та стійкості зазначеної системи відносяться до статичних величин, то вони не можуть характеризувати протікання процесу змін в часі і їх розрахункові моделі не можуть бути використані для поставленої задачі. Тому введено поняття деформативності колії і для вирішення цієї задачі застосовано напрацювання математичної фізики.

Динамічна деформативність колії – виникнення під впливом навантаження конструкції колії деформацій, викликаних змінами форми, розмірів або об'єму елементів за рахунок вібрації елементів конструкції колії чи їхніх частин, змін властивостей матеріалів елементів та зумовлені всіма перемінами переміщення окремих точок конструкції колії. Під процесом деформативної роботи колії будемо розуміти явища динамічної деформативності, що відбуваються під впливом рухомого складу. Описання процесу деформативності виконується на засадах математичної фізики.

Математична фізика є частиною загальної теорії диференціальних рівнянь у приватних похідних. Назва «математична фізика» пов'язана з тим, що ця частина виникла з розгляду декількох простих, але важливих задач фізики. Основних рівнянь математичної фізики небагато. Всі вони – лінійні диференціальні рівняння другого порядку однієї невідомої функції, коефіцієнти яких вважаються зазвичай постійними величинами. Виключення мають так звані телеграфні рівняння: лінійні диференціальні рівняння другого порядку однієї невідомої функції, але зі змінними коефіцієнтами.

Оскільки рівняння математичної фізики – це лінійні диференціальні рівняння, отже, загальний інтеграл визначається за відомими правилами. Але головне ускладнення, з яким доводиться мати справу під час розв'язання рівнянь математичної фізики, полягає у тому, що визначувана функція повинна задовольняти як рівняння математичної фізики, так і рівняння другого порядку, які описують початкові і граничні умови. Останні не будуть довільними функціями, оскільки повинні підкорятись низці обмежуючих умов та володіти спеціальними

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

властивостями. Існують спеціальні методи для інтегрування рівнянь математичної фізики, в задачах яких застосовують різноманітні початкові та граничні умови. Вони поділяються на такі:

– перший метод Пуассона для лінійних рівнянь з приватними похідними та постійними коефіцієнтами, за умов обмеженого середовища;

– другий метод Фур'є: інтегрування рівнянь з приватними похідними для середовища, що обмежене відповідними умовами;

– третій метод засновано на результатах дослідження Коші та на його теорії так званих інтегральних обчисленнях;

– четвертий метод – метод інтегральних рівнянь.

Таким чином математичний апарат для застосування розроблено, але потрібно адаптувати його під поставлену задачу.

За поставленою задачею складено рівняння руху, початкові та граничні умови на засадах теорії пружної роботи. Для виведення рівнянь застосовано як метод Лагранжа, так і метод Ейлера, тобто, з одного боку, розглядається рух певної частки середовища в часі, та з другого – прийнято до уваги наявність заданого поля швидкостей та розглядається зміна швидкостей руху в певному перетині за деякий час. Постановка динамічної задачі з визначення процесу деформативної роботи залізничної колії зводиться до того, що в заданій області Ω необхідно знайти поля напружень σ_{ij} , деформацій ε_{ij} , переміщень u_i та щільності ρ_i , що задовольняють в будь-який момент часу t такі рівняння:

– руху

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

– граничним умовами

$$\sigma_{ij} n_j = \tau_i; \quad (2)$$

– залежностей Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \Theta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

$$\Theta = j_1(\varepsilon_{ij}) = \text{divu}; \quad (3)$$

– залежностей Коші

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (4)$$

– збереження маси

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div} \bar{v} = 0. \quad (5)$$

Початкові дані формуються згідно з такими умовами. Розглянута ділянка колії знаходиться в стані спокою, тобто початковий час відповідає відсутності впливу рухомого складу на колію. Процес впливу рухомого складу на колію відбувається за передбачений час, що залежить від швидкості руху поїзда. Причому, цей час включає як стан спокою до впливу дії рухомого складу, так і стан спокою після його впливу. Стан спокою колії відповідає відсутності дії сил, що призводять до переміщень будь-яких точок системи конструкцій нижньої та верхньої будов колії. Таким чином, розглядається не перетин колії, як, зазвичай, в статичних або квазі-динамічних розрахунках, а ділянка колії, довжина якої залежить як від величин навантаження на колію, так і від швидкості їх переміщення по ній. Величини переміщень, деформацій та напружень застосовуються для визначення всіх видів змін енергій, що витрачаються на виконання робіт зовнішніми та внутрішніми силами, які призводять до протікання процесу деформативної роботи колії під час впливу рухомого складу на неї.

Таким чином, складені рівняння та визначені початкові та граничні умови привели до розв'язання лінійних диференціальних рівнянь другого порядку однієї невідомої функції з постійними коефіцієнтами [2, 3].

Мета

Метою дослідження є визначення основних фізико-конструктивних умов при моделюванні життєвого циклу роботи елементів залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності як основи створення нормативної бази роботи колії за умов забезпечення надійності залізниць.

Методика

Моделі, за якими встановлені допустимі та рекомендовані значення у нормативних документах, повністю виконують поставлені задачі, але не можуть відповісти на питання щодо інтенсивності накопичення залишкових деформацій в колії, тобто не можуть характеризувати протікання процесу змін в часі. Тому спочатку необхідно встановити, на основі врахування яких фізико-конструктивних умов можна розглядати зазначені питання.

При постановці задачі математичної фізики, де потрібне визначення рішення на основі раніше сформульованих умов, зазвичай висувають такі три вимоги:

- рішення повинно існувати;
- рішення повинно бути однозначно визначеним;
- рішення повинно безперервно залежати від даних задачі.

Перша вимога математично сама собою зрозуміла: від рішення не слід вимагати суперечливих властивостей.

Друга вимога говорить, що задача повинна бути поставлена з належною повнотою.

Третя вимога виправдана з точки зору принципів пристосованості аналітичної задачі до явищ природи. Тобто з умови задачі повинні використовуватись не різко фіксовані дані. Наприклад, задані в задачі значення довжин або часу завжди пов'язані з деякими невеликими межами похибки. Математична задача вважається адекватною для опису реальних явищ, якщо зміні запропонованих даних в достатньо вузьких межах відповідає така ж мала (обмежена наперед заданими кордонами) зміна результату. Третя вимога виражає фізичну визначеність задачі.

Задачу з диференціальними рівняннями, що задовольняє перерахованим вимогам, вважають коректно поставленою.

Існування рішення складеного неоднорідного диференціального рівняння з приватними похідними другого порядку гіперболічного типу з парним числом незалежних змінних доведено багатьма авторами. Цей доказ ґрунтується на існуванні рішення однорідного рівняння, за допомогою якого з відповідними початковими даними вирішується неоднорідне рівняння.

Крайова задача при довільній гладко-кускової границі задовольняє вище поставленій вимозі однозначності. Ця однозначність випливає безпосередньо з того факту, що гармонійна функція, регулярна в деякій області, приймає своє найбільше та найменше значення на границі області, отже тотожно зникає, якщо всі її крайові значення дорівнюють нулю.

Вимога безперервної залежності рішення від крайових значень також виконана, оскільки виконується теорема про досягнення екстремальних значень на границі: якщо два різних, наперед заданих крайових значення відрізняються між собою усюди менше, ніж на деяку малу величину, то відповідні їм гармонійні функції у всій області не можуть відрізнятися більше, ніж на цю величину.

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

Отже, задача є коректно поставленою.

Крім того, при розгляданні такої задачі буде виконано принцип Гюйгенса. Для визначення

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

поводження системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії обов'язковість виконання цього принципу є необхідною. Згідно з принципом 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 чотиримірною простору: зміни об'єму в часі. Його врахування дасть можливість розглядати процес деформативності в повному обсязі, причому максимальні прогини елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії не збігаються в часі за перетином та впливають на деформації елементів зазначеної системи та деформативність самої системи.

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

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

$$s(x, y, z, t) = A \sin(\omega t - kr + \varphi), \quad (6)$$

де A – амплітуда коливань; ω – частота впливу зовнішньої сили; k – хвильове число; r – радіус сферичної хвилі; φ – фаза відповідності зовнішніх та внутрішніх коливань: якщо їх фази співпадають, то $\varphi = 0$, якщо різні, то $\varphi = \pi$.

Значення амплітуди A_0 , що викликає зовнішня сила, визначено згідно з другим та третім законами Ньютона [8], за якими швидкість зміни імпульсу механічної системи дорівнює головному вектору впливу зовнішніх сил, що діють на цю систему

$$\frac{dK}{dt} = F. \quad (8)$$

Механічна система в цьому випадку – система з конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії. Для зазначеної системи прийнятно, що дія зовнішньої сили, маса та швидкість системи – змінні величини. Тому рух такої системи відповідає рівнянню:

$$ma = F_{cp} + F_p, \quad (9)$$

де F_p – реактивна сила, що враховує імпульс приєднаної або відокремленої маси; F_{cp} – середнє значення перемінної зовнішньої сили.

Остаточне значення амплітуди A_0 визначається як:

$$A_0 = \frac{r(F_{cp}\Delta t \sin(\omega\Delta t) + v_1\Delta m)}{\omega \cos(\omega\Delta t - kr + \varphi)\Delta m}, \quad (10)$$

де v_1 – швидкість приєднаної або відокремленої маси.

Розміри хвилі розраховано згідно з [1].

Результати

Для оцінки процесу деформативної роботи колії необхідно складати розрахункові схеми конструкції колії. Якщо б розрахунки напружено-деформованого стану системи конструкцій верхньої та нижньої будов виконувались за існуючими розрахунками на міцність, то для визначення розрахункової осі так, щоб еквівалентні сили були найбільшими, необхідно розглянути ділянку довжиною 6 м, що обмежено довжиною лінії впливу розрахункової осі екіпажу [9]. Але ця розрахункова схема пов'язана з такими фізико-конструктивними характеристиками елементів нижньої та верхньої будов колії як: модуль пружності підрейкової основи, модуль деформації рейкової сталі, моменти опору та інерції поперечного перетину рейки, площі підкладки та полушпали з врахуванням її вигину, товщина щебеню, епюра шпал.

Із застосуванням методу кінцевих елементів, при впливі сили, що прикладена в зоні контакту центрального положення колеса та рейки в прямих ділянках, ця довжина також складатиме 6 м. Для розрахунку потрібно мати фізико-конструктивні характеристики, що описують повну геометрію кожного елемента системи конструкцій верхньої та нижньої будов. Висота насипу або товщина розглянутої виїмки

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

повинні бути не менше 3 м. Крім того, повинно мати значення модулів деформації, щільності та вид контакту для всіх елементів [20].

Якщо розглядати той же процес за допомогою запропонованого методу, то довжина розрахункової схеми повинна включати ділянки впливу як прямого, так і зворотного впливу діючої сили.

На довжину ділянки впливатиме по черзі: 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 матеріалів (модуль пружності, щільність, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнти тертя та зчеплення як самих матеріалів, так і контактуючих пар, імпеданс), що характеризують кількісно процес розповсюдження коливань. Для сипких матеріалів необхідно застосувати дані, що відповідають AS 1141.4, 1141.6 та C. 1141.18 [18]. В табл. 1 наведено значення величин, що формують процес деформативності ділянки при впливі чотиривісного вагона ЦНІІІ-ХЗ-0.

В таблиці наведено:

- швидкість руху;
- максимальні нормальні/дотичні напруження на площі контакту;
- площа контакту рейки з колесом;
- довжина контакту вздовж рейки;
- +-частота обертів колеса;
- частота впливу зовнішньої сили;
- час дії на площі контакту.

В табл. 1 перший рядок демонструє значен-

ня для контакту нових коліс з новими рейками, а друга – нових коліс зі зношеними рейками. Для формування коректних умов навантаження, що адекватно описують реальні умови, було вивчено діючі стандарти [12, 13] та сучасні дослідження [6, 7, 11, 14, 15, 16, 17, 19].

Та зазначені характеристики викликають дуже різний характер коливання. Безпосередньо це видно зі співвідношення максимальних напружень на площі контакту та часу дії на ній для нових та зношених рейок при тій же частоті обертів коліс. Крім того, існує різниця між напруженнями, що реалізуються при контакті рейки та колеса. Так при нових рейках найбільші нормальні та дотичні напруження виникають на поверхні в центрі еліпса, а при ковзанні коліс по рейці реалізуються, крім нормальної, дотичні повздовжні та поперечні складові, що розташовані на межах контактної площадки вздовж та поперек головки рейки. Всі зазначені характеристики коливаються в певних межах, тому довжина розрахункової ділянки також коливається і залежно від швидкості руху і необхідної повноти вивчення процесу довжина розглянутої ділянки коливається від 25 до 400 м. Але існує певна закономірність: чим менша швидкість, тим більшу ділянку необхідно розглядати. Це пов'язано з двома факторами. По-перше, чим більша різниця між швидкостями руху поїзда та поширення поверхневої хвилі, тим більше часу відбувається коливання точок, оскільки збільшується контактуюча поверхня між рейкою та колесом, що передає вплив рухомого складу на точку. По-друге, чим більша різниця між швидкостями руху поїзда та поширення хвилі в середовищі, тим більша кількість відбитих процесів, які надають точці додаткових коливань.

Таблиця 1

Характеристики процесу коливань вагона ЦНІІІ-ХЗ-0

Table 1

Characteristics of fluctuations process, car CRI-H3-0

V, км/год	P_0 / τ_0 , МПа	ω , см ²	a, м	ω_k , рад/с	ω , рад/с	t, с
10	1275/402	1,2904	1,28	5,85	6,81	0,461449
	582/221	2,6327	0,68		12,76	0,246274

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Закінчення табл. 1

End of table 1

V, км/год	P_0 / τ_0 , МПа	ω , см ²	a, м	ω_k , рад/с	ω , рад/с	t, с
20	1293/407	1,3270	1,30	11,70	13,43	0,233974
	595/226	2,6885	0,70		24,98	0,125747
30	1311/413	1,3639	1,32	17,54	19,87	0,158134
	607/231	2,7443	0,71		36,71	0,085572
40	1328/418	1,4003	1,34	23,39	26,14	0,120172
	619/235	2,7990	0,73		47,99	0,065459
50	1345/424	1,4354	1,35	29,24	32,28	0,097337
	631/240	2,8516	0,74		58,89	0,05335
60	1362/429	1,4716	1,37	35,09	38,25	0,082131
	642/244	2,9054	0,75		69,36	0,045297
70	1378/434	1,5074	1,39	40,94	44,09	0,071248
	654/249	2,9582	0,77		79,47	0,039531
80	1395/439	1,5442	1,40	46,78	49,79	0,063098
	666/253	3,0121	0,78		89,20	0,035221
90	1411/445	1,5805	1,42	52,63	55,36	0,056743
	678/258	3,0652	0,80		98,61	0,031859
100	1428/450	1,6179	1,44	58,48	60,80	0,051669
	690/262	3,1193	0,81		107,66	0,029179
110	1444/455	1,6555	1,45	64,33	66,12	0,047514
	702/267	3,1735	0,82		116,41	0,026988
120	1460/460	1,6926	1,47	70,18	71,33	0,044041
	714/271	3,2268	0,84		124,89	0,025154

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна. Дослідження питань надійності колії мотивує розробку нових моделей, що дають можливість розглядати її протягом

деякого напрацювання. Існує необхідність визначення основних фізико-конструктивних умов для складання розрахункових схем, на основі яких можливі оцінка та прогнозування зміни станів колії в процесі її експлуатації. В роботі запропоновано основні фізико-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

конструктивні засади складання розрахункових схем елементів залізничної колії, за яких виконується принцип Гюйгенса. Зазначений принцип може виконуватись тільки при розгляді чотиримірному простору: зміни об'єму в часі. Практична значимість. Аналітичні моделі, що застосовані при визначенні параметрів міцності та стійкості колії, повністю задовольняють поставленим задачам, але не можуть бути застосовані для визначення параметрів надійності колії. Одним з головних факторів неможливості застосування цих моделей є квазідинамічний підхід. Тому, зазвичай, отримують та досліджують не сам динамічний процес роботи залізничної колії, а його наслідки. Крім того, такі моделі відносяться до плоских, що також додає певні складнощі порівняння результатів з експериментом, оскільки нелегко в об'ємному процесі виділити вплив в його обмежених частинах. Застосування числових методів розширюють можливості, але також унеможливають розгляд самого динамічного процесу, оскільки неможливо ввести процеси, що зумовлюють реакцію на навантаження. Тому запропоновані основні фізико-конструктивні підходи при моделюванні дають можливість розглядати безпосередньо динамічний процес локалізований як в часі, так і в просторі.

Висновки

Обізнаність в процесах взаємодії колії та рухомого складу призводить до розглядання нових задач. Одним з нових аспектів цього процесу є вирішення задач надійності колії. Складовою надійності колії є функціональна безпека колії. Таким чином, напрямок досліджень є актуальним, але таким, що потребує нового підходу при вирішенні поставленої проблеми і не може застосовувати існуючі моделі для її вирішення.

При дослідженні процесу деформативності в системах конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії необхідне точне визначення цього процесу як в часі, так і в просторі. Таким чином, необхідно правильно сформулювати задачу та визначити вхідні дані. 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 матеріалів (модуль пружності, щільність, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнти тертя та зчеплення як самих матеріалів, так і контактуючих пар, імпеданс), що характеризують кількісно процес розповсюдження коливань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баштова, В. Г. Топологическая неустойчивость полуограниченной капли магнитной жидкости / В. Г. Баштова, А. Г. Рекс, А.-Д. Т. М. Мансур // *Весті Нацыян. акад. навук Беларусі. Серья фізіка-тэхнічных навук.* —2013. — № 4. — С. 64–69.
2. Бондаренко, І. О. Стосовно питань моделювання життєвого циклу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко // *Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп.* — 2015. — № 1 (55). — С. 78–89. doi: 10.15802/stp2015/38247.
3. Бондаренко, І. О. Формування оціночних умов життєвого циклу деформативної роботи залізничної колії / І. О. Бондаренко // *Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп.* — 2015. — № 3 (57). — С. 107–117.
4. ГОСТ 32192-2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. — Введ. 2014–07–01. — Москва : Стандартиформ, 2014. — 32 с.
5. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0269 // *Наказ Мін. інфраструктури України від 01 берез. 2012 р. № 072-Ц.* — Київ : Мін. інфраструктури України, Укрзалізниця, 2012. — 456 с.
6. Kleiner, O. Исследование напряжений в контакте колесо-рельс / O. Kleiner // *Ж.-д. мира.* — 2011. — № 1. — С. 54–58.
7. Конечно-элементное моделирование и исследование эволюции контактных напряжений при страгивании железнодорожного колеса / И. Д. Арсеньев, А. И. Боровков, Д. Ю. Сараев, Д. В. Шевченко // *Вестн. Пермского нац. исследоват. политехн. ун-та. Механика.* — 2011. — № 2. — С. 5–13.
8. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Москва : Наука, 1987. — Т. 1. — 210 с.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

9. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0113 : Наказ Мін. трансп. та зв'язку України від 10 серп. 2004 р. № 630-ЦЗ. – Київ : Мін. трансп. та зв'язку України, Укрзалізниця, 2004. – 32 с.
10. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 : Наказ Мін. трансп. та зв'язку України від 13 груд. 2004 р. № 960-ЦЗ. – Київ : Мін. трансп. та зв'язку України, Укрзалізниця, 2004. – 170 с.
11. Соотношения между сопротивлениями качению и скольжению при движении локомотива по кривым и при извилистом движении колесной пары / Н. П. Довбня, Л. М. Бондаренко, Д. В. Бобырь, Р. А. Коренюк // Проблемы трибологии. – 2013. – № 1. – С. 43–46.
12. AAR Manual of Standards and Recommended Practices: Wheel and Axles. – Washington : Publications Department Transportation Technology Center, Inc., 2009. – 166 p.
13. EN 13979-1:2003+A2:2011. Railway applications – Wheelsets and bogies. Monobloc wheels. Technical approval procedure : Forged and rolled wheels [Required by Directive 2008/57/EC]. – London : British Standard Institution, 2011. – 54 p. doi: 10.3403/02960998.
14. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads / X. Bian, H. Jiang, C. Cheng [et al.] // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2014. – Vol. 66. – P. 368–384. doi:10.1016/j.soildyn.-2014.08.003.
15. Kik, W. A fast Approximate Method to Calculate Normal Load at Contact between Wheel and Rail and Creep Forces During Rolling / W. Kik, J. Piotrowski // Proc. of 2nd Mini Conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (29.07.–31.07.1996) / Techn. Univ. of Budapest. – Budapest, 1996. – P. 52–61.
16. Kouroussis, G. Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation / G. Kouroussis, O. Verlinden, C. Conti // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2011. – Vol. 31. – Iss. 4. – P. 692–707. doi: 10.1016/j.soildyn.2010.11.012.
17. Propagation Characteristics of Elastic Wave in High-Speed Railway Embankment and Its Application to Defect Detection / M. Chen, S. Feng, A. Che, H. Wang // Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering : Proc. Intern. Conf. (26–28 May 2014). – Shanghai, 2014. – P. 20–28. doi: 10.1061/9780784413425.003.
18. Report № 685. Aggregates proficiency testing program : Proficiency Testing Australia. – Silverwater NSW : PTA, 2010. – 27 p.
19. Srolarski, T. A. Rolling contacts / T. A. Srolarski, S. Tobe. – London : Professional Engineering Publishing Ltd., 2000. – 445 p. doi: 10.1002/9781118903001.
20. Wriggers, P. Nonlinear finite element analysis / P. Wriggers. – Berlin : Springer, 2008. – 559 p. doi: 10.1007/978-3-540-71001-1.

И. А. БОНДАРЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-30

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАТИВНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Научная статья предполагает определение основных физико-конструктивных условий при моделировании жизненного цикла работы элементов железнодорожного пути для исследования развития процессов деформирования как основы создания нормативной базы работы пути при условии обеспечения надежности железных дорог. **Методика.** Для достижения цели использованы принципы теории упругости и распространения волнового процесса при описании взаимодействия пути и подвижного состава. **Результаты.** Установлены основные физико-конструктивные условия, на основе которых необходимо проводить моделирование жизненного цикла работы элементов железнодорожного пути для исследования развития процессов деформативности. Сформулированы основные физико-конструктивные принципы составления расчетных схем элементов железнодорожного пути для оценки процесса деформационной работы пути. Доказаны корректность и возможность решения поставленной задачи. **Научная новизна.** Исследование вопросов надежности пути мотивирует разработку новых моделей, которые позволяют рассматривать ее в течение некоторой наработки. Существует необходимость определения основных

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

физико-конструктивных условий для составления расчетных схем, на основе которых возможны оценка и прогнозирование изменения состояний пути в процессе ее эксплуатации. В работе предложены основные физико-конструктивные принципы составления расчетных схем элементов железнодорожного пути, при которых выполняется принцип Гюйгенса. Указанный принцип может выполняться только при рассмотрении четырехмерного пространства: изменения объема во времени. **Практическая значимость.** Аналитические модели, примененные при определении параметров прочности и устойчивости пути, полностью удовлетворяют поставленным задачам, но не могут быть применены для определения параметров надежности пути. Одним из главных факторов невозможности применения этих моделей является квазидинамичный подход. Поэтому, как правило, получают и исследуют не один динамический процесс работы железнодорожного пути, а его последствия. Кроме того, такие модели относятся к плоским, что также добавляет определенные сложности в сравнении результатов с экспериментом, так как нелегко в объемном процессе выделить влияние в его ограниченных частях. Применение численных методов расширяет возможности, но также делает невозможным рассмотрение самого динамического процесса, ибо невозможно ввести процессы, обуславливающие реакцию на нагрузку. Поэтому предложенные основные физико-конструктивные подходы при моделировании позволяют рассматривать непосредственно динамический процесс, локализованный как во времени, так и в пространстве.

Ключевые слова: моделирование; жизненный цикл; деформативность пути; остаточные деформации; работоспособность; волновое распространение; напряженно-деформированное состояние пути; надежность пути; перемещения пути

I. O. BONDARENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Railway Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 42, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-30

FEATURES OF THE RESEARCH WORK ELEMENTS DEFORMABILITY OF RAILWAY TRACK

Purpose. The scientific paper is supposed the determination of basic physical and structural conditions in modeling life cycle of the elements of the railway line for the study of deformation processes as the basis of normative base of the track at the condition of railway safety. **Methodology.** To achieve the aim principles of the elasticity theory and wave propagation process in the description of the interaction between the track and rolling stock were used. **Findings.** The basic physical and structural conditions under which it is necessary to carry out the simulation of the life cycle of the elements of the railway line for the study of deformation processes were determined. The basic physical and structural principles of drawing the design schemes of railway track elements for the process assessment of the track deformation work were formulated. The decision correctness and the possibility of the problem solution are proved. **Originality.** The study of the track reliability questions motivates the development of new models, allow considering it for some developments. There is a need to identify the main physical and structural conditions for assembly design schemes based on assessment and prediction of possible track state changes during its operation. The paper presents the basic principles of physical and structural drafting design schemes of railway line items for which Huygens' principle is implemented. This principle can be performed only when the four dimensional space: the volume changing over time is considered. **Practical value.** Analytical models applied in determining the parameters of strength and resistance lines, fully satisfy the task, but can not be used to determine the parameters of track reliability. One of the main impossibility factors of these models is quasidynamic approach. Therefore, as a rule, receive and examine not only dynamic process of a railway track, but also its consequences. Besides, these models are related to flat ones, and it also adds some complexity in results comparing with an experiment, as well as the process is not easy to distinguish the impact of volume in its limited parts. The use of numerical methods extend the possibilities, and it also make it impossible for the consideration of the dynamic process, as well as it is impossible to introduce processes, causing the reaction to stress load. Thus the basic physical and constructive approaches in modeling make it possible to consider the dynamic process of localized both in time and in space directly.

Keywords: modeling; life cycle; the deformability of the way; the residual strain; efficiency; wave propagation; the stress-strain state of the path; path reliability; path of travel

REFERENCES

1. Bashtova V.G., Reks A.G., Mansur A.D.T.M. Topologicheskaya neustoychivost poluogranichennoy kapli magnitnoy zhidkosti [Topological instability of a semi-infinite drops of magnetic fluid]. *Vesці Нацыян. акад. навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук* [News of National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences], 2013, no. 4, pp. 64-69.
2. Bondarenko I.O. Stosovno pytan modeliuvannia zhyttievoho tsykladu deformatyvnoi roboty elementiv zaliznychnoi kolii [To the modeling issues of life cycle of deformation work of the railway track elements]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 1 (55), pp. 78-89. doi: 10.15802/stp2015/38247.
3. Bondarenko I.O. Formuvannia otsinochnykh umov zhyttievoho tsykladu deformatyvnoi roboty zaliznychnoi kolii [Formation of estimated conditions for life cycle of deformation work of the railway track]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 3 (57), pp. 107-117.
4. GOST 32192-2013. Nadezhnost v zheleznodorozhnoy tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [State standart 32192-2013. Reliability in railway engineering. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 p.
5. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy TsP-0269* [Manual for installation and maintenance of the tracks of the Railways of Ukraine TsP-0269]. Kyiv, Ministerstvo infrastruktury Ukrainy, Ukrzaliznytsia Publ., 2012. 456 p.
6. Kleiner O. Issledovaniye napryazheniy v kontakte koleso-rels [The study of stresses in the contact wheel-rail]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the World*, 2011, no. 1, pp. 54-58.
7. Arsenev I.D., Borovkov A.I., Sarayev D.Yu., Shevchenko D.V. Konechno-elementnoye modelirovaniye i issledovaniye evolyutsii kontaknykh napryazheniy pri stragivanii zheleznodorozhnogo kolesa [Finite element modeling and study of the evolution of the contact stresses in the breakaway the railway wheels]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2011, no. 2, pp. 5-13.
8. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika* [Theoretical Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1987, vol. 1, 210 p.
9. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robit na zaliznytsiakh Ukrainy TsP-0113* [Position about carrying out of scheduled preventive repair and track work on the railways of Ukraine TsP-0113]. Kyiv, Ministerstvo infrastruktury Ukrainy, Ukrzaliznytsia Publ., 2004. 32 p.
10. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist TsP-0117* [Rules of payment of railway track on the strength and stability of the Tsp-0117]. Kyiv, Ministerstvo infrastruktury Ukrainy, Ukrzaliznytsia Publ., 2004. 170 p.
11. Dovbnya N.P., L.M. Bondarenko, Bobyr D.V., Korenyuk R.A. Sootnosheniya mezhdru soprotivleniyami kacheniyu i skolzheniyu pri dvizhenii lokomotiva po krivym i pri izvilistom dvizhenii kolesnoy pary [The ratio between the rolling resistance and slip during motion of the locomotive on curves and twisting motion of the wheelset]. *Problemy trybolohii – Problems of Tribology*, 2013, no. 1, pp. 43-46.
12. AAR Manual of Standards and Recommended Practices: Wheel and Axles. Washington, Publications Department Transportation Technology Center Inc. Publ., 2009. 166 p.
13. EN 13979-1:2003+A2:2011: Railway applications – Wheelsets and bogies. Monobloc wheels. Technical approval procedure : Forged and rolled wheels. London, British Standart Institution Publ., 2011. 54 p. doi: 10.3403/02960998.
14. Bian X., Jiang H., Cheng C., Chen Y., Chen R., Jiang J. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 368-384. doi:10.1016/j.soildyn.2014.08.003.
15. Chen M., Feng S., Che A., Wang H. Propagation Characteristics of Elastic Wave in High-Speed Railway Embankment and Its Application to Defect Detection. *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, 2014, pp. 20-28. doi: 10.1061/9780784413425.003.
16. Kik W., Piotrowski J. A fast Approximate Method to Calculate Normal Load at Contact between Wheel and Rail and Creep Forces During Rolling. Proc. of 2nd Mini. Conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (29.07.-31.07.1996). Budapest, Techn. Univ. of Budapest Publ., 1996, pp. 52-61.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

17. Kouroussis G., Verlinden O., Conti C. Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, issue 4, pp. 692-707. doi: 10.1016/j.soildyn.2010.11.012.
18. Report №. 685. Aggregates proficiency testing program. Proficiency Testing Australia. Silverwater NSW, PTA Publ., 2010. 27 p.
19. Srolarski T.A., Tobe S. Rolling contacts. London, Professional Engineering Publishing Ltd. Publ., 2000. 445 p. doi: 10.1002/9781118903001.
20. Wriggers P. Nonlinear finite element analysis. Berlin, Springer Publ., 2008. 559 p. doi: 10.1007/978-3-540-71001-1.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна), д.т.н., проф. Д. В. Лаухіним (Україна)

Надійшла до редколегії: 13.04.2015

Прийнята до друку: 18.06.2015