

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

СТОСОВНО ПИТАНЬ МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. В статті розглянуто моделювання 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 розповсюдження хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу. **Результати.** Запропоновано та сформульовано основні положення стосовно поняття «життєвий цикл деформативної роботи колії». Встановлено метод, на основі якого отримано алгоритм визначення результатів динамічного впливу рухомого складу на колію. Сформульовано основні засади складання розрахункових схем елементів залізничної колії для оцінки процесу деформативної роботи колії. Розроблено алгоритм, що дає можливість отримати значення полів напружень, деформацій та переміщень всіх точок елементів конструкції колії. На основі отриманих полів напружено-деформованого стану колії створено алгоритм зі встановлення залежності процесу деформативності та кількості енергії, що необхідно витратити на деформативну роботу колії. **Наукова новизна.** Дослідження питань із надійності колії мотивує розробку нових моделей, що дають можливість розглядати її протягом деякого напруження. Існує необхідність визначення критеріїв, на основі яких можливі оцінка та прогнозування зміни станів колії в процесі її експлуатації. В роботі запропоновано основні засади, методи, алгоритм та терміни щодо дослідження питань із надійності колії. **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 квазідинамічний 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 певні складнощі порівняння результатів з експериментом, так як нелегко в об'ємному процесі виділити вплив в його обмежених частинах. Застосування чисельних методів розширюють можливості, але також унеможливають розгляд самого динамічного процесу, так як неможливо ввести процеси, що обумовлюють реакцію на навантаження. Тому запропоноване моделювання дає можливість розглядати безпосередньо динамічний процес та зробити його оцінку завдяки введеному новому параметру – життєвому циклу деформативної роботи колії.

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

Вступ

Відомо, що найважливіші елементи конструкції колії, що визначають безпеку руху поїздів, такі як рейки та стикові накладки (з мен-

шим терміном служби колії), баластна призма та земляне полотно (з більшим терміном служби колії), отримують пошкодження в більшості випадків не через те, що за будь-яких факторів (механічних, атмосферних, біологічних) відбу-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

вся динамічний силовий вплив рухомого складу на них, бо перевищив межі міцності, навіть з врахуванням статистичної дії цих впливів, а внаслідок багаторазового прикладення до них різноманітних за величиною навантажень, що зумовили розвиток пошкоджень або дефектів, тобто внаслідок розвитку процесу втоми як самих матеріалів елементів конструкції колії, так і втоми конструкції загалом.

Оскільки питання інтенсивності накопичення залишкових деформацій в колії безпосередньо пов'язано з економікою її експлуатації, то розрахунки та дослідження залізничної колії разом із параметрами міцності і тими, що вирішують питання безпеки, повинні давати можливість визначати інтенсивність накопичення залишкових деформацій залежно від конструкції колії, системи її утримання та впливу рухомого складу і його режиму обертання по колії.

В цій роботі стоїть задача щодо моделювання життєвого циклу роботи елементів залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності, тому перш за все необхідно встановити термінологію, яка розкриє зміст досліджень.

Передумови введення нового критерію. Пропонується ввести новий критерій оцінки залізничної колії – деформативність.

Залежно від виду розрахунку деформативність може бути статичною та динамічною, причому статична є складовою динамічної деформативності.

Статична деформативність колії – виникнення пружних деформацій у навантаженій конструкції колії, викликаних як пружними змінами форми або розмірів елементів конструкції колії чи їхніх частин, так і зумовлені цими змінами переміщення окремих точок конструкції колії.

Якщо розглянути зміни, що відбуваються в конструкції залізничної колії, при впливі навантаження від рухомого складу, то такі елементи як піщана подушка, баластний шар, підкладки, прокладки та дерев'яні шпали зазнають як переміщення, так і деформації; рейки та залізобетонні шпали – переважно переміщення, земляне полотно – тільки деформацію. Якщо конструкція колії знаходиться під навантаженням, тоді сукупність деформацій і переміщень елементів, що складають конструкцію залізничної колії або їх частин, і є її деформативністю.

Введення нового критерію повинно бути реально обґрунтовано, тому що його наявність

викликає додаткову відповідальність. Крім того, новий критерій повинен доповнювати існуючі не дублюючи їх. Тому нижче наведені передумови, які обґрунтовують введення нового критерію.

1. Якщо розглядати конструкцію залізничної колії як цілісну систему, що складається з окремих елементів (рейок, скріплення, шпал, баластного шару та земляного полотна), які схильні до зносу, то на цьому етапі відсутня єдина методика оцінки працездатності такої системи.

2. Дотепер не має висновків та рекомендацій щодо оптимальної жорсткості колії з точки зору подовження строку її експлуатації.

3. Конструкція рейко-шпальної решітки безстикової колії передбачає укладання по довжині колії однотипних елементів з однаковими характеристиками. Такі елементи, як рейкові пліті й залізобетонні шпали відповідають цим вимогам, а скріплення – ні. В роботі скріплення основну роль відіграють прокладки, які й характеризують жорсткість скріплення. Згідно з [5] жорсткість прокладок ПРЦП-4, ПНЦП 31–1 може змінюватись на 8 %, ПРП-2 з поліуретану на 533 %, а ПРП-2 з поліетилену на 200 %, а не співпадання їх товщини може змінюватись в інтервалі 3 мм. Що теж вносить розкид в їх жорсткість. Таким чином, жорсткість однотипних скріплення з прокладками, які відповідають технічним вимогам та розташовані на сусідніх шпалах, можуть значно відрізнятись, що зведе до мінімуму всі зусилля щодо забезпечення рівножорсткості безстикової конструкції колії навіть під час укладання її на підготовлену під шпальну основу.

4. Щоб ефективно використовувати скріплення, необхідно встановити для кожного його типу оптимальний режим роботи, тобто інтервал значень модуля пружності підшпальної основи. А розробка вимог до жорсткості скріплення залежно від модуля пружності підшпальної основи дає можливість якісно розробляти їх конструкцію.

5. Не досить розроблено методик у посилення та стабілізації земляного полотна за рахунок укладання стабілізуючих шарів в залежності від категорії колії. Введення нового критерію дасть можливість розрахунку конструкції стабілізуючого шару для підсилення та стабілізації земляного полотна.

6. Застосування стабілізуючих шарів та ефективно використання скріплення згідно з пара-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

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

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

8. Введення критерію деформативності колії поєднає розрахунки верхньої та нижньої будов колії під час встановлення конструкції за певними умовами експлуатації та навпаки.

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

Статична деформативність оцінюється за допомогою модуля пружності підрейкової основи колії.

Але деформації в конструкції колії під впливом часу дії рухомого складу та зміни кліматичних умов не завжди належать тільки до пружних, а зазвичай вони є часткою пружних та залишкових деформацій. Окрім того, змінення швидкості руху призводить до того, що конс-

трукція під впливом руху поїзда не реалізує повний прогин, тому статична деформативність є часткою при визначенні надійної роботи конструкції колії. Таким чином, під час моделювання життєвого циклу роботи елементів залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності необхідно розглядати динамічні процеси, які відбуваються протягом терміну служби конструкції колії.

Динамічна деформативність – 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 змінами переміщення окремих точок конструкції колії.

Мета

Метою дослідження є моделювання життєвого циклу деформативної роботи колії для дослідження процесу змін станів колії протягом напрацювання за певних умов.

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. Тому спочатку необхідно розробити інструмент, на основі якого можна розглядати зазначені питання.

В сучасних аналітичних розрахунках основною прийнята модель залізничної колії, де прийнято рейку як балку, що лежить на суцільній пружній основі. Для підвищення точності розрахунку на міцність необхідно вдосконалювати схеми, які застосовуються для досліджень взаємодії колії та рухомого складу. Зокрема необхідно брати до уваги як пружні і дисипативні, так і інерційні властивості підрейкової основи. Але ця модель повністю виключає вирішення задач, пов'язаних зі швидкісним рухом, надійністю роботи конструкції колії та можливістю прогнозування її станів за часом.

Дослідженню динамічної реакції на рухоме навантаження присвячено багато наукових праць. Однією з перших робіт, де було розглянуто реакцію одновимірної системи на рухоме

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

навантаження, є робота Д. Ахенбахом [7], який розглянув динамічну реакцію одновимірної балки Тимошенко, що лежить на пружній основі. У 1970 році А. П. Філіппов [6] опублікував свої монографії, присвячені аналізу таких систем.

Пізніше дослідники почали розглядати більш складні періодично неоднорідні системи, що враховують шпальну структуру колії. У 1981 році Л. Жезекюль [10] опублікував роботу, де вперше було розглянуто реакцію балки, що лежить на періодичних еквідистантних опорах, на рух навантаження. Після цього було виконано велику кількість досліджень, присвячених аналізу як континуальних, так і періодичних одновимірних систем. Особливо слід виділити в цій низці робіт публікації Р. Богача, Т. Кржизінського і К. Поппа [9], а також роботу П. М. Білоцерківського [8].

З середини 90-х років почалися масові дослідження тривимірних моделей залізничного полотна, що було зумовлено бурхливим розвитком високошвидкісного залізничного транспорту. Як виявилось, поверхневі хвилі в ґрунті, що викликані такими поїздами, чинять істотний вплив на динаміку рухомого складу, та одномірні моделі показали себе неспроможними для опису руху поїздів з великими швидкостями. Особливо слід відзначити огляд по відомих до того часу моделях залізничного полотна К. Кноте [12].

У всьому світі здійснюють численні теоретичні та експериментальні дослідження з вивчення взаємодії основи і ґрунту. Аналітичним шляхом вирішено вкрай обмежену кількість таких завдань. Для реальних же граничних умов, характерних для задач фундаментобудівництва та гірничої справи, а тим більше в неоднорідних середовищах [13], аналітичне рішення практично неможливе. Тому переважна більшість сучасних досліджень у цьому напрямку здійснюється з використанням чисельних методів, що дозволяють отримувати рішення за будь-яких складних граничних умов.

Серед різних чисельних методів механіки суцільних середовищ найбільш досконалим і широко застосовуваним є метод кінцевих елементів (МСЕ) [14]. Причина настільки великої популярності МСЕ полягає в його алгоритмі і доброю сумісністю з системами автоматичного проектування. Поява високопродуктивних комп'ютерів призвела до значного збільшення досліджень, присвячених фізично нелінійним задачам пластичної зміни, граничного стану та ін.

На сьогодні існує багато розрахункових комплексів і програм, заснованих на МСЕ. Найбільш відомими і універсальними з них є розрахункові комплекси ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, Nastran, Plaxis, ПК ЛІРА та ін. Також є безліч програм, призначених для вирішення спеціальних задач або проблем вузької спрямованості. Вони дозволяють вести розрахунки складних споруд на вплив різних навантажень, у тому числі вирішувати задачі з визначення напружено-деформованого стану систем з урахуванням взаємодії ґрунту і конструкції.

Однак вони мають і недоліки. Зокрема, в розрахункових комплексах під час обліку взаємодії ґрунту та конструкції використовуються тільки ті моделі, які закладені спочатку (пластичність, повзучість, ділатансія та інші. особливості ґрунтів), але не враховується зміна міцності і пористості ґрунту в процесі деформування. До того ж в існуючих розрахункових комплексах відсутня можливість врахування всіх визначальних фізичних параметрів системи конструкції ґрунту одночасно.

Загальним недоліком цих моделей є те, що вони належать до крайових задач, тобто вирішують задачу для конкретних умов і не дають змогу на їх основі розробити комплекси із загальним підходом вирішення задач і таким чином також виключають вирішення задач, пов'язаних із надійністю роботи конструкції колії та можливістю прогнозування її станів за часом.

В процесі вивчення існуючих напрямків розвитку моделей, що наведені вище, та зіставляючи їх придатність щодо описання фізики процесу взаємодії колії і рухомого складу, дійшли висновку, що необхідно застосовувати моделі, які засновані на описі хвильового розповсюдження пружних хвиль. Застосування теорії поширення пружних хвиль для вирішення завдань напружено-деформованого стану твердого тіла описані в низці фундаментальних робіт класичної фізики. Як теоретична основа були прийняті роботи [1, 3, 11].

Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформованого стану залізничної колії.

Згідно з існуючою теорією хвильового розповсюдження пружних хвиль, вони поділяються на об'ємні та поверхневі. Відповідно до лінійної теорії пружності в однорідному ізотропному середовищі при динамічному впливі на нього

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

в будь-якій точці виникають два види об'ємних хвиль: поздовжні стиску P і поперечні зсуву S . Останні не можуть поширюватися в рідких і газоподібних середовищах, оскільки ці середовища не володіють пружністю форми. У них можуть поширюватися лише поздовжні хвилі.

Швидкість розповсюдження хвиль в земляних конструкціях за [4] наведена в табл. 1. Значення швидкостей, наведених в табл. 1, можна порівняти зі швидкостями поїздів. Звідки дійдемо висновку, що при відповідному стані земляного полотна швидкість навантаження на колію навіть більша, ніж швидкість її реакції. А при неоднорідному стані земляного полотна в подовжній площині таке співвідношення може призвести до втрати колією стійкості. Але такий вид стійкості поки що не розглядався в дослідженнях стійкості колії. Це пов'язано більше з тим, що при пружній роботі земляного полотна швидкість навантаження на колію значно менша за швидкість її розповсюдження.

Поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) – пружні хвилі, що поширюються уздовж поверхні твердого тіла або уздовж кордону з іншими середовищами. ПАХ поділяються на два типи: з вертикальною поляризацією і з горизонтальною поляризацією.

До найбільш поширених приватних випадків поверхневих хвиль можна віднести такі:

– хвилі Релея, в класичному розумінні поширюються уздовж кордону пружного півпростору з вакуумом або достатньо розрідженим газовим середовищем, (SV типу). Швидкість поширення хвилі Релея VR змінюється від 0,874 до 0,956 значення VS. Енергія їх локализована в поверхневому шарі товщиною від однієї до двох довжин хвилі;

– затухаючі хвилі релеївського типу на кордоні твердого тіла з рідиною;

– незатухаюча хвиля з вертикальною поляризацією, що біжить по межі рідини і твердого тіла;

– хвиля Стоунлі, поширюється уздовж плоскої межі двох твердих середовищ, модулі пружності і щільності яких не сильно відрізняються. Ця хвиля складається ніби з двох релеївських хвиль (по одній в кожному середовищі). Вертикальна і горизонтальна компоненти зміщень в кожному середовищі зменшуються при віддаленні від кордону так, що енергія хвилі виявляється зосередженою у двох граничних шарах товщиною, що дорівнює довжині хвилі;

Таблиця 1

Швидкості пружних поздовжніх V_p та поперечних V_s хвиль

Table 1

Velocity of longitudinal V_p and cross V_s elastic waves

Типи ґрунтів	V_p , м/с	V_s , м/с	V_s/V_p
Водоненасичені			
валуно-галечні відкладення	500–1 000	250–500	0,60–0,70
піски	200–500	150–300	0,50–0,70
супіски	250–700	150–400	0,45–0,60
суглинки	300–1 000	150–500	0,30–0,55
глини (включаючи корінні)	400–1 800	200–600	0,15–0,35
Водонасичені			
валуно-галечні відкладення	2 000–2 700	250–500	0,10–0,20
піски	1 500–2 000	150–300	0,10–0,18
супіски	1 500–1 800	150–400	0,10–0,20
суглинки	1 500–1 900	150–500	0,10–0,25
глини (включаючи корінні)	1 800–2 500	200–600	0,10–0,25

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

– хвилі Лява – поверхневі хвилі з горизонтальною поляризацією (SH типу), які можуть поширюватися в структурі пружного шару на пружному півпросторі. Хвиля Лява утворюється тільки в шарі (або пачці шарів) із зниженою швидкістю поперечних хвиль VS1, що підставляються товщею більш високошвидкісних порід VS2. Швидкість поширення хвиль Лява VL залежить від частоти коливань і змінюється в межах: $VS1 < VL < VS2$. Глибина проникнення хвилі в півпростір змінюється від часток довжини хвилі до багатьох довжин хвилі залежно від товщини шару h , частоти і параметрів середовища. Саме існування хвилі Лява як ПАХ пов'язано з наявністю шару на півпросторі: при $h \rightarrow 0$ глибина проникнення хвилі в півпростір прагне до нескінченності і хвиля переходить в об'ємну.

У деяких випадках на межі середовищ утворюються обмінні хвилі (відбиті і заломлені), пов'язані зі зміною типу хвилі.

На вільній поверхні шаруватого середовища можуть реєструватися такі типи хвиль:

- поздовжні – прямі, відображені і заломлені (від різних кордонів), а також різні види багаторазово відбитих і заломлених хвиль;
- поперечні – тих же класів, що поздовжні;
- обмінні – відбиті, заломлені і різні комбінації відбито-заломлених хвиль;
- поверхневі хвилі Релея і Лява.

Для зв'язних ґрунтів типовою є квазіанізотропія, що пов'язана з тонкошаруватістю самих шарів. У такому середовищі не існує чистих поздовжніх і поперечних хвиль, а лише подібні їм квазіпоздовжні і квазіпоперечні. Останні, як правило, можуть бути двох типів: типу SH –

коливання частинок паралельно шаруватості і типу SV коливання частинок перпендикулярно шаруватості. Таким чином, необхідно описати розповсюдження всіх видів хвиль та врахувати їх сумісну дію.

Ще одним з недоліків дослідження цього питання є те, що вимірювальна техніка, що застосовується в експериментах, має невелику, порівняно із справжніми випромінюваннями хвиль, частоту запису. В табл. 2 наведено інформацію щодо оцінки квазівібрації. Так, якщо розглянуто існуючу квазідинамічну модель, що застосовується в розрахунках колії на міцність, під час руху рухомого складу зі швидкістю 30 км/год, при повному ігноруванні реакції елементів конструкції колії на динамічний вплив рухомого складу, то за одну секунду на цифровому записі повинні отримати: 87 відбитих хвиль від всієї конструкції, 335 – без земполотна, 457 – без піщаної подушки і земполотна, 5 400 – без сипучої основи, 14 000 – тільки від рейки. Всього – 20 288 імпульсів.

Зараз максимальна частота дискретизації запису цифрової апаратури дослідної лабораторії 4 кГц, тобто між суміжними вимірами проходить 1/4 000 секунд [2].

Крім зазначених спрощень, не враховано як мінімум п'ять поверхневих процесів.

Таким чином, необхідно розробити динамічну просторову модель розповсюдження хвиль в конструкції колії з урахуванням того, що точність розрахунку повинна коливатись в межах 0,0001...0,000001 с, залежно від характеристик матеріалів елементів колії.

Таблиця 2

Оцінка процесу квазівібрації

Table 2

The evaluation of quasi-vibration process

Елемент	V_p , м/с	Товщина елемента, м	Час проходження, с	Кількість проходів хвилі за 1 с в обидві сторони	Кількість імпульсів на 1 вимір
рейка	5 100	0,18	3,52941E-05	28 000	7
шпала	3 500	0,2	5,71429E-05	17 500	4,375
щебінь	400	0,4	0,001	1 000	0,25
пісок	500	0,2	0,0004	2 500	0,625
супісок	700	3	0,004285714	200	0,05

Результати

Під процесом деформативної роботи колії будемо розуміти явища динамічної деформативності, що відбуваються під впливом рухомого складу.

Для оцінки процесу деформативної роботи колії складаються розрахункові схеми конструкції колії за таких передумов:

1) залізнична колія розглядається як просторова система об'єктів, що є збиранням елементів конструкції колії, які характеризуються геометричними розмірами і фізичними властивостями, відповідно до нормативної літератури, що визначають напрямки і швидкості поширення хвиль, тобто якісну оцінку процесу деформативної роботи колії;

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

3) залізнична колія є системою суцільних середовищ, що володіють властивістю стискання ($\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{m}{\Delta V} \neq \text{const}$) з певними законами поведінки;

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

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

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

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

$$\frac{d^2 \bar{u}}{dt^2} = \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}, \nabla) \bar{v}, \quad (1)$$

де $\frac{d\bar{v}}{dt}$ – локальна зміна швидкості, що відбувається в певній точці простору за рахунок не

стаціонарності поля швидкостей; $\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}$ – конвективна складова, що є наслідком неоднорідності поля швидкостей, зміна швидкості переміщення певної частки за час dt по дузі dl .

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

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

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

Якщо $f(x_1, x_2, x_3) = \text{const}$ – рівняння поверхні току, то $(\bar{v}, \text{grad } f) = 0$.

На колію діє зовнішня сила від впливу рухомого складу:

$$F = F_A \sin \omega t, \quad (2)$$

де F_A – максимальне значення сили при дії рухомого складу на колію, тобто її амплітуда; ωt – коливається від 0 до π , та за цей час t , що залежить від швидкості руху, колесо проходить весь цикл впливу на колію: тиск з'являється, поступово збільшується до максимального, та згасає.

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

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

$$s(x, y, z, t) = A \sin(\omega t - kr + \varphi), \quad (3)$$

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

Таким чином постановка динамічної задачі з визначення процесу деформативної роботи

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

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 рівняння в будь-який момент часу t :

– руху:

$$\nabla^2 u_i + \frac{1}{1-2\nu} \Theta_i = -\frac{\rho}{\mu} \left(f_i - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right); \quad (4)$$

– з граничними умовами:

$$\sigma_{ij} n_j = \tau_i; \quad (5)$$

– залежностей Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \Theta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad \Theta = j_1(\varepsilon_{ij}) = \text{div} u; \quad (6)$$

– залежностей Коші:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (7)$$

– збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div} \bar{v} = 0. \quad (8)$$

Одиничність рішення досягається шляхом формування початкових:

$$\begin{cases} u|_{t=0} = \Phi_0(x, y, z), \\ \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = \Phi_1(x, y, z) \end{cases} \quad (9)$$

та граничних умов:

$$u|_s = f(x, y, z, t). \quad (10)$$

Коректність рішення досягається відповідною стійкістю за Ляпуновим.

Розрахунки за цим алгоритмом надають можливість визначити залежність між змінами процесу деформативної роботи колії та станами колії за показниками надійності.

Моделювання життєвого циклу деформативної роботи залізничної колії за умов забезпечення надійності залізниць.

Тепер вважається, що проблема визначення різноманіття сил, які діють на залізничну колію, вирішена з достатньою для практичних потреб строгістю. І вся практика підтверджує правильність положення, що виникаючи в колії зусилля, напруження та деформації підкоря-

ються імовірнісним та стохастичним закономірностям. Оскільки дослідження різноманітних механічних характеристик залізничної колії виявляють, що такі її характеристики як модуль пружності, пружні характеристики матеріалів, з яких виготовлено елементи конструкції колії, розміри колії та окремих її елементів, що виміряні в різних точках ділянки колії, можуть бути описані тільки імовірнісними закономірностями. Точно так враховуючи варіації в конструктивному оформленні і технологічному виготовленні одного і того ж типу екіпажа, питання про з'ясування впливу будь-якого екіпажа на рейки розглядають, як задачу теорії імовірності. Таким чином теорія взаємодії колії і рухомого складу є однією з гілок загальної статистичної механіки. І дає можливість розгляду і опису роботи колії у часі за всіма глобальними параметрами механічної системи.

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

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

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

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

За законом термодинаміки:

$$\delta K + \delta U = \delta A + \delta Q. \quad (11)$$

Значення зміни кінетичної енергії становить:

$$\delta K = \left(\frac{\delta K}{\delta t} \right) \delta t = \iiint_V \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \delta u_i \rho dV. \quad (12)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Значення зміни роботи, що здійснюється зовнішніми силами за той же елемент часу δt становить:

$$\delta A = \iiint_V (\sigma_{ij,j} + \rho f_i) \delta u_i dV + \iiint_V \sigma_{ij} \delta u_i. \quad (13)$$

Зміна внутрішньої енергії тіла δU дорівнює сумі зміни роботи деформації та теплової енергії δQ , що передається тілу

$$\delta U = \iiint_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \delta Q. \quad (14)$$

Рівняння теплопровідності в просторі – однорідне:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (15)$$

де x, y, z – відповідно координати; t – час; u – температура в точці; $u|_{t=0} = \phi(x, y, z)$; a – відомий коефіцієнт.

В кожній точці поверхні S конструкції колії задається температура: $u|_S = \Psi_1(P, t)$.

$\Psi_1(P, t)$ – відома функція точки поверхні S та часу $t \geq 0$.

За цим розповсюдженням визначається кількість теплової енергії.

Далі виконуються розрахунки зі встановленням залежностей процесів деформативності та кількості енергії, що необхідно витратити на деформативну роботу. Та через зв'язок зі станами надійності прогнозується поведінка конструкції колії за певних умов.

Наукова новизна та практична значимість

Дослідження питань з надійності колії мотивує розробку нових моделей, що дають можливість розглядати її протягом деякого напрацювання. Існує необхідність визначення критеріїв, на основі яких можливі оцінка та прогнозування зміни станів колії в процесі її експлуатації. В роботі запропоновано основні засади, методи, алгоритм та терміни щодо дослідження питань з надійності колії. Практична значимість. Аналітичні моделі, що застосовані під час визначення параметрів міцності та стійкості колії, повністю відповідають 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 належать до плоских, що також додає певні складнощі порівняння результатів з експериментом, оскільки нелегко в об'ємному процесі виділити вплив в його обмежених частинах. Застосування чисельних методів розширюють можливості, але також унеможливають розгляд самого динамічного процесу, оскільки неможливо ввести процеси, що обумовлюють реакцію на навантаження. Тому запропоноване моделювання дає можливість розглядати безпосередньо динамічний процес та оцінити цей процес завдяки введеному новому критерію – життєвому циклу деформативної роботи колії.

Висновки

Обізнаність в процесах взаємодії колії та рухомого складу призводить до розгляду 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 для вирішення поставленої проблеми.

Вивчення розвитку фізико-математичних методів розв'язання задач щодо визначення напружено-деформованого стану в механіці деформованого твердого тіла дозволили обрати метод рішення поставленої задачі. Таким методом є застосування теорії розповсюдження хвиль.

Аналіз роботи конструкції колії допоміг визначитись з:

– передумовами для складання розрахункових схем конструкції колії;

– визначенням сил, що задіяні в процесі розповсюдження навантажень на колію;

– визначенням необхідних величин, які характеризують процес розповсюдження навантажень. До основних величин відносяться: поля переміщень, деформацій, напружень та значення витрат всіх видів енергії;

– критеріями, які необхідно застосовувати для розгляду тривалої роботи колії;

– формулюванням термінів, які необхідно застосовувати під час дослідження тривалої роботи колії.

На основі поєднання знань щодо можливос-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

тей методу розрахунку та протікання фізичного процесу роботи колії визначено:

- основний вид рівняння руху;
- початкові умови розрахунку;
- граничні умови розрахунку.

Розроблено алгоритм виконання досліджень, тобто повний комплекс модулювання життєвого циклу деформативної роботи залізничної колії за умов забезпечення надійності залізниць.

Загальні матеріали, що наведені в статті, дають змогу перейти до встановлення характеристик станів надійності та залежностей, які пов'язують між собою ці стани.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ
ДЖЕРЕЛ

1. 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 // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 139–148.
2. 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.
3. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Теория упругости. Т. VII / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Наука, 1987. – 248 с.
4. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств связанных грунтов. – Москва : ЦНИИС, 1976. – 70 с.
5. Практичні рекомендації щодо проведення входного контролю якості матеріалів верхньої будови колії : розпорядження Головного управління колійного господарства України від 30.01.2003 р. № ЦП-7/72. – Дніпропетровськ : Арт-Прес, 2003. – 196 с.
6. Филиппов, А. В. Колебания деформируемых систем / А. В. Филиппов. – Москва : Машиностроение, 1970. – 734 с.
7. Achenbach, J. D. Moving load on a flexible supported Timoshenko beam / J. D. Achenbach, C. T. Sun // Intern. J. of Solid and Structures. – 1965. – № 1. – P. 353–370. doi : 10.1016/0020-7683(65)90001-6.
8. Belotserkovskiy, P. M. On the oscillations of infinite periodic beams subjected to a moving concentrated force / P. M. Belotserkovskiy // J. of Sound and Vibration. – 1996. – № 193 (3). – P. 706–712. doi : C10.1006/jsvi.1996.0309.
9. Bogacz, R. On dynamics of systems modeling continuous and periodic guideways / R. Bogacz, T. Krzyzinski, K. Popp // Archives of Mechanics. – 1993. – № 45 (5). – P. 575–593.
10. Jezequel, L. Response of periodic systems to a moving load / L. Jezequel // ASME J. of Applied Mechanics. – 1981. – № 48 (3). – P. 603–618.
11. Hadamard, J. Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations / J. Hadamard. – New York : Dover Publications, 1954. – 315 p. doi : 10.1063/1.3061337.
12. Knothe, K. Gleisdynamik und Wechselwirkung zwischen Fahrzeug and Fahrweg / K. Knothe // ZANGHEWMATHMECH. – 1999. – № 79 (11). – P. 723–737. doi : 10.1002/(sici)1521-4001(199911)79:11%3C723::aid-zamm723%3E3.0.co;2-m.
13. Kulikovskii, G. On the nonuniqueness of solutions to the nonlinear equations of elasticity theory / A. G. Kulikovskii, A. P. Chugainova, E. I. Sveshnikova // J. of Engineering Mathematics. – 2006. – Vol. 55, № 1–4. – P. 97–110.
14. Wriggers, P. Nonlinear finite element analysis / P. Wriggers. – Berlin : Springer, 2008. – 559 p.

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 0000-0003-4717-3032

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЕФОРМАТИВНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. В статье рассмотрено моделирование жизненного цикла работы элементов железнодорожного пути для исследования развития процессов деформативности как основы создания нормативной базы работы пути

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

при условии обеспечения надежности железных дорог. **Методика.** Для достижения цели использованы основы теории распространения волнового процесса при описании взаимодействия пути и подвижного состава. **Результаты.** Предложены и сформулированы основные положения относительно понятия «жизненный цикл деформационной работы пути». Установлен метод, на основе которого получен алгоритм определения результатов динамического воздействия подвижного состава на путь. Сформулированы основные принципы составления расчетных схем элементов железнодорожного пути для оценки процесса деформативной работы пути. Разработан алгоритм, который дает возможность получить значения полей напряжений, деформаций и перемещений всех точек элементов конструкции пути. На основе полученных полей напряженно-деформированного состояния пути создан алгоритм по установлению зависимости процесса деформативности и количества энергии, затрачиваемой на деформативную работу пути. **Научная новизна.** Исследования вопросов надежности пути мотивируют разработку новых моделей, дают возможность рассматривать ее в течение некоторой наработки. Существует необходимость определения критериев, на основе которых возможны оценка и прогнозирование изменения состояний пути в процессе его эксплуатации. В работе предложены основные принципы, методы, алгоритм и термины, касающиеся проведения исследования вопросов надежности пути. **Практическая значимость.** Аналитические модели, используемые при определении параметров прочности и устойчивости пути, полностью удовлетворяют поставленные задачи, но не могут быть применены для определения параметров надежности пути. Одним из главных факторов невозможности применения этих моделей является квазидинамический 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 сравнения результатов с экспериментом, так как нелегко в объемном процессе выделить его влияние в ограниченных частях. Применение численных методов расширяет возможности, но также делает невозможным рассмотрение самого динамического процесса, так как невозможно ввести процессы, обуславливающие реакцию на нагрузку. Поэтому предложенное моделирование позволяет рассматривать непосредственно динамический процесс и оценивать его благодаря новому критерию – жизненному циклу деформационной работы пути.

Ключевые слова: моделирование; жизненный цикл; деформативность пути; остаточные деформации; работоспособность; волновое распространение; напряженно-деформированное состояние пути; надежность пути; перемещение 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 irna_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

TO THE MODELING ISSUES OF LIFE CYCLE OF DEFORMATION WORK OF THE RAILWAY TRACK ELEMENTS

Purpose. This article highlights the operational cycle modeling of the railway track elements for the development processes study of deformability as the basis of creating a regulatory framework of the track while ensuring the reliability of the railways. **Methodology.** The basic theory of wave propagation process in describing the interaction of track and rolling stock are used to achieve the goal. **Findings.** The basic provisions concerning the concept «the operational cycle of the deformation track» were proposed and formulated. The method was set. On its base the algorithm for determining the dynamic effects of the rolling stock on the way was obtained. The basic principles for the calculation schemes of railway track components for process evaluation of the deformability of the way were formulated. An algorithm was developed, which allows getting the field values of stresses, strains and displacements of all points of the track design elements. Based on the fields of stress-strain state of the track, an algorithm to establish the dependence of the process of deformability and the amount of energy expended on the deformability of the track operation was created. **Originality.** The research of track reliability motivates the development of new models, provides an opportunity to consider it for some developments. There is a need to define the criteria on which the possibility of assessing and forecasting changes in the track states in the course of its operation. The paper proposed the basic principles, methods, algorithms, and the terms relating to the conduct of the study, questions the reliability of the track. **Practical value.** Analytical models, used to determine the parameters of strength and stability of tracks, fully meet its objectives, but cannot be applied to determine the parameters of track reliability. One of the main factors of impossibility to apply these models is a quasi-dynamic approach. Therefore, as a rule, not only one dynamic process of the railway track is prepared and assayed, but also its consequences. In addition, such models are flat, that

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

also adds some complexity to compare the results with the experiment, since the process is not easy to distinguish the bulk of its limited influence in parts. The application of numerical methods extends the capabilities, and makes it impossible to consider the dynamic process, because it is impossible to introduce the processes that govern the response to the load. Therefore, the proposed modeling makes it possible to examine directly the dynamic process and evaluate the process due to the new criterion, the operational cycle of the strain gauge.

Keywords: modeling; operational cycle; the deformability of the track; the residual strain; efficiency; wave propagation; the stress-strain state of the track; track reliability; track travel

REFERENCE

1. Bondarenko I.O., Kurgan D.M. Vyrishennia zadach nadiinosti systemy na osnovi modeliuvannia napruzhenodeformatsiinoho stanu zaliznychnoi kolii zasobamy teorii rozpovsiudzhennia pruzhnykh khvyli [Solution of the problems of system reliability on the basis of modeling of stress-strain state of the track using the theory of elastic waves propagation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 139-148.
2. Bondarenko I.O., Kurgan D.M., Patlasov O.M., Savluk V.Ye. Vykorystannia tsyfrovoy vymiriuvanoi tekhniki dlia eksperymentalnykh doslidzen vzaiemodii kolii i rukhomoho skladu [The use of digital measuring instruments for experimental studies of interaction between track and rolling stock]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]*, 2011, issue 37, pp. 124-128.
3. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika. Teoriya uprugosti* [Theoretical physics. Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. VII. 248 p.
4. *Metodicheskyye rekomendatsii po primeneniyu seismoakusticheskikh metodov dlya izucheniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv svyaznykh gruntov* [Guidelines on the application of seismic acoustic methods for studying the physical and mechanical properties of cohesive soils]. Moscow, TsNIIS Publ., 1976. 70 p.
5. *Praktychni rekomendatsii shchodo provedennia vkhidnoho kontroliu yakosti materialiv verkhnoi budovy kolii* [Practical recommendations for the incoming quality control of materials for the track structure]. Dnipropetrovsk, Art-Press Publ., 2003. 196 p.
6. Filippov A.V. *Kolebaniya deformiruyemykh sistem* [Fluctuations of deformed systems]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1970. 734 p.
7. Achenbach J.D., Sun C.T. Moving load on a flexible supported Timoshenko beam. *International Journal of Solid and Structures*, 1965, no. 1, pp. 353-370. doi : 10.1016/0020-7683(65)90001-6.
8. Belotserkovskiy P.M. On the oscillations of infinite periodic beams subjected to a moving concentrated force. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, no. 193 (3), pp. 706-712. doi : C10.1006/jsvi.1996.0309.
9. Bogacz R., Krzyzinski T., Popp K. On dynamics of systems modeling continuous and periodic guideways. *Archives of Mechanics*, 1993, no. 45 (5), pp. 575-593.
10. Jezequel L. Response of periodic systems to a moving load. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1981, no. 48 (3), pp. 603-618.
11. Hadamard J. *Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations*. New-York, Dover Publications, 1954. 315 p. doi : 10.1063/1.3061337.
12. Knothe K. Gleisdynamik und Wechselwirkung zwischen Fahrzeug and Fahrweg. *ZANGEWMATHMECH*, 1999, no. 79 (11), pp.723-737. doi : 10.1002/(sici)1521-4001(199911)79:11%3C723::aid-zamm723%3E3.0.co;2-m.
13. Kulikovskii A.G., Chugainova A.P., Sveshnikova E.I. On the nonuniqueness of solutions to the nonlinear equations of elasticity theory. *Journal of Engineering Mathematics*, 2006, vol. 55, no. 1-4, pp. 97-110.
14. Wriggers P. *Nonlinear finite element analysis*. Berlin, Springer Publ., 2008. 559 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. Д. В. Лаухнім (Україна)

Надійшла до редколегії 30.10.2014

Прийнята до друку 15.12.2014