

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

НАБОЧЕНКО ОЛЬГА СЕРГІЇВНА

УДК 625.141:625.173.5:625.032.3

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЩЕБЕНЕВОГО
БАЛАСТНОГО ШАРУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ**

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
РИБКІН Віктор Васильович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри «Колія та колійне господарство».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ШИРІН Леонід Нікіфорович,
Державний вищий навчальний заклад України «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри транспортних систем і технологій, м. Дніпропетровськ;

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
ГОВОРУХА Володимир Васильович,
Інститут геотехнічної механіки імені М. С. Полякова НАН України, завідувач лабораторією проблем рейкового транспорту, м. Дніпропетровськ.

Захист відбудеться «25» квітня 2013 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, ауд. 314

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розіслано « 15 » березня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
докт. техн. наук, доцент



А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Залізничний транспорт відіграє важливу роль в економічному розвитку країни і є основою її транспортної системи. Однак сьогодні залізничний транспорт стає менш конкурентноздатним відносно інших видів транспорту, що пов'язано із світовими економічними змінами та несприятливою економічною ситуацією, яка склалася в державі. Ефективне функціонування залізничного транспорту є необхідною умовою стабілізації і розвитку економіки та забезпечення національної безпеки країни.

Одним із шляхів підвищення конкурентноздатності залізничного транспорту є зменшення витрат на його інфраструктуру завдяки продовженню терміну життєвого циклу колії, збільшенню міжремонтних інтервалів та підвищенню ефективності утримання колії.

Одним з найважливіших елементів колії, від якого залежить термін життєвого циклу колії, є баластний шар, оскільки він найбільш інтенсивно розлашдується. Погіршення геометрії колії починається, в першу чергу, через розлашдування баластного шару, що в подальшому приводить до збільшення динамічних навантажень на всі інші елементи колії та зменшення терміну їх служби.

Робота баластного шару залежить від одночасного взаємного впливу найважливіших груп факторів, а саме: факторів конструкції колії, рухомого складу, експлуатаційних умов та факторів утримання. На основі знання механізмів розлашдування баластного шару та факторів, які на нього впливають, можна прогнозувати процес розлашдування геометрії колії і, відповідно до цього, будувати стратегію поточного утримання та ремонтів колії.

Актуальність теми. Науково-технічна задача покращення ефективності роботи баластного шару є актуальною як в теоретичному, так і практичному плані.

Теоретична сторона цієї задачі на сьогоднішній день є недостатньо дослідженою. Особливо це стосується внутрішніх процесів сприйняття, передачі вібраційного навантаження та руху частинок у баластному шарі. Найменш вивченими є довготривалі процеси виникнення нерівномірних залишкових деформацій у баластному шарі, які, в свою чергу, спричиняють порушення геометрії колії упродовж пропуску сотень млн. т вантажу. Не менш актуальним є застосування неруйнівних методів акустичного контролю стану ущільнення баласту.

Практична актуальність задачі, в першу чергу, пов'язана із покращенням показників ефективності роботи залізничної колії за рахунок: раціонального підбору параметрів конструкції колії й її початкової якості для заданих експлуатаційних умов при існуючому способі утримання геометрії колії; встановлення умов експлуатації для існуючої конструкції колії та при заданих умовах утримання геометрії колії; визначення раціонального утримання баластного шару при заданих умовах експлуатації та існуючої конструкції колії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота тісно пов'язана із науково-дослідними роботами кафедри «Колія та колійне господарство», Колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії та ГНДЛ «Механіки ґрунтів» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Методи та

моделі, що були розроблені у межах дисертаційної роботи, були застосовані в науково-дослідних роботах, що виконувались за завданням Головного управління колійного господарства Укрзалізниці та держбюджетними темами:

1. «Експериментальні дослідження впливу епюри шпал на динаміко-деформаційні характеристики колії» (№ ДР 0106U011748).

2. «Проведення досліджень та розробка рекомендацій по визначенню ефективності використання динамічних стабілізаторів різних конструкцій при виконанні модернізації колії на довгостроково закритих перегонах» (№ ДР 0107U005237).

3. «Підвищення поперечної стійкості безстикової колії на залізобетонних шпалах у кривих радіусом менше 350 м» (№ ДР 0109U003741).

4. «Дослідження причин втрати стійкості рейко-шпальної решітки залізничної колії» (№ ДР 0110U000949).

Мета роботи. Метою даної дисертаційної роботи є підвищення ефективності експлуатації баластної залізничної колії з точки зору покращення роботи баластного шару шляхом встановлення раціональних параметрів конструкції колії та рухомого складу, експлуатаційних умов при оптимальних міжремонтних інтервалах.

Задачі досліджень.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Провести системний аналіз існуючих досліджень по роботі баластного шару в колії та впливу на його роботу різноманітних факторів.

2. Розробити математичну модель, що описує роботу залізничної колії та баластного шару в ній під короткочасним та довготривалим динамічним навантаженням.

3. Розробити метод визначення фактичного ступеня ущільнення баластного шару при виконанні ремонтів колії, як важливої складової початкової якості колії.

4. Удосконалити існуючий метод практичного розрахунку роботи баластного шару із врахуванням процесу розладнання геометрії колії та впливу на неї факторів конструкції колії, її початкової якості, умов експлуатації та утримання.

5. Розробити пропозиції щодо підвищення ефективності експлуатації баластної залізничної колії шляхом раціонального підбору параметрів конструкції колії, параметрів технології ремонтів колії та утримання її геометрії.

Об'єкт досліджень – явище розладнання геометрії залізничної колії.

Предмет досліджень – залишкові деформації баластного шару залізничної колії.

Методи досліджень. В роботі використано комплексний метод досліджень, який включає теоретичну та експериментальну частини. Для теоретичних досліджень застосовувались методи математичного моделювання динаміки систем коротко- та довготривалих процесів, а саме: метод скінченних різниць, методи багатовимірної оптимізації та методи чисельного розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь, які застосовувались при моделюванні динамічної взаємодії колії з рухомим складом. Для досліджень динамічних процесів всередині баластного шару під дією вібраційних навантажень застосовано метод молекулярної динаміки. В експериментальні дослідження ввійшли натурні й лабораторні вимірювання, у яких вимірювався імпульсний відклик, напруження в рейках, їх

прогин та ін. У статистичній обробці результатів експериментальних вимірів застосовувались методи цифрової обробки сигналів, такі як перетворення Фур'є, Гільберта, методи аналізу, такі як кластерний, лінійний і дискримінантний аналіз. Для досліджень застосовувалась теорія розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість.

Отримані наукові положення, висновки і рекомендації базуються на обробці й аналізі лабораторних та натурних вимірювань на реальних ділянках колії Львівської, Південно-Західної, Придніпровської та Донецької залізниць і на результатах теоретичних досліджень, виконаних за допомогою математичної моделі взаємодії колії з рухомим складом, що враховує динамічну роботу баластного шару та розвиток залишкових деформацій у ньому при багатократній дії на нього вібраційного навантаження. Достовірність результатів моделювання перевірена шляхом їх порівняння з результатами натурних вимірів напружено-деформованого стану колії та лабораторних і натурних вимірювань імпульсного відклику баластного шару.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель коротко- і довготривалих процесів взаємодії колії з рухомим складом та розладнання баластного шару, що дозволяє прогнозувати розвиток нерівності при багатократному проходженні через неї рухомого складу; також ця модель дозволяє відобразити динамічний рух частинок баластного шару і процес осідання окремої шпали у баласті під дією вібраційного горизонтального та вертикального навантажень.

2. Вперше на залізницях України запропоновано підхід до визначення ступеня ущільнення баластного шару при виконанні ремонтів колії важкими колійними машинами, в якому, на відміну від методу, що застосовується у сейсморозвідці, крім кінематичної інтерпретації імпульсного відклику використовується також і динамічна інтерпретація. Використання в аналізі таких критеріїв як початок спектру сигналу, миттєва частота, передній фронт хвилі дозволяє отримати надійні значення ступеня ущільнення для баластного шару. На основі лабораторних вимірювань встановлено характерні значення цих параметрів для ущільненого та неущільненого баласту.

3. Встановлено закономірності взаємозв'язку між ступенем ущільнення, що виражається параметрами імпульсного відклику баластного шару, та параметрами рівномірного й нерівномірного осідання баластного шару у фазі стабілізації. Ці закономірності дозволяють врахувати важливу складову початкової якості реальних ділянок колії та із використанням розробленого методу спрогнозувати подальше розладнання її геометрії.

4. Вперше розроблено теоретичний підхід до розрахунку розладнання геометрії колії з точки зору роботи баластного шару, який враховує безперервну зміну геометричного стану колії протягом терміну її експлуатації та вплив на розладнання баластного шару основних факторів конструкції колії, рухомого складу, факторів утримання колії та умов експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів

1. На основі розробленої у дисертаційній роботі математичної моделі виконано розрахунки розвитку нерівності залізничної колії при епюрах розкладки шпал 1840 і

1680 шт./км. Дано оцінку доцільності застосування розрідженої епюри розкладки шпал 1680 шт./км в залежності від вантажонапруженості із врахуванням економічної ефективності. Результати досліджень використані при розробці практичних рекомендацій щодо застосування розрідженої епюри шпал 1680 шт./км на залізницях України, прийняті Головним управлінням колійного господарства Укрзалізниці та впроваджені на всіх залізницях України.

2. Запропонований у даній роботі метод визначення ступеня ущільнення баластного шару використано при розробці рекомендацій щодо доцільності використання динамічних стабілізаторів колії DGS-62 та ДСП під час виконання ремонтів колії. Розроблені метод, пристрій та програмне забезпечення дозволяють здійснювати реєстрацію, автоматизовану обробку та аналіз імпульсного відклику баластного шару та оцінку ступеня ущільнення баласту.

3. Із використанням запропонованого методу розрахунку розладнання геометрії колії вирішена важлива науково-технічна задача визначення рекомендованих максимально ймовірних величин вертикальних нерівностей з точки зору покращення роботи баластного шару, при яких призначаються роботи з виправлення геометрії колії, а також встановлення раціональних умов експлуатації (швидкості руху та осьового навантаження).

4. Отримані в дисертації висновки та результати використано в науково-дослідних роботах кафедри «Колія та колійне господарство» та Колієвипробувальної ГНДЛ Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за напрямками підвищення ефективності роботи існуючих конструкцій залізничної колії та технології її ремонтів та утримання, що виконувалися за замовленням Укрзалізниці. Розроблені у даній дисертаційній роботі модель взаємодії колії з рухомим складом та метод визначення ступеня ущільнення баластного шару використані при уточненні «Методики розрахунку втрати стійкості рейко-шпальної решітки під дією зовнішніх силових факторів», яка розроблена Львівським науково-дослідним інститутом судових експертиз Міністерства юстиції України. Отримані в дисертації результати також застосовано в навчальному процесі Львівської філії Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при вивченні дисциплін «Улаштування та експлуатація залізничної колії», «Залізнична колія» та «Колійне господарство».

Особистий внесок здобувача. Постановку мети і задачі дослідження здійснено спільно з науковим керівником. Автором дисертаційної роботи особисто було виконано планування і проведення теоретичних та експериментальних досліджень, збір статистичних даних й обробку отриманого матеріалу. Розроблені модель розладнання геометрії колії через осідання баластного шару при тривалій її експлуатації, практичний метод розрахунку розладнання геометрії колії із врахуванням основних факторів конструкції колії, експлуатації та утримання, спосіб визначення ступеня ущільнення баластного шару. Автором самостійно сформульовано наукові положення і висновки.

У публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації і які написані у співавторстві, автором виконано: лабораторні та натурні виміри імпульсного відклику баластного шару та їх аналіз [1]; багатоваріантні розрахунки впливу

параметрів колії на вібраційну дію рухомого складу на баластний шар та їх аналіз [2]; розробку математичної моделі динамічного руху частинок баластного шару у вертикальній площині вздовж шпали під дією горизонтального вібраційного навантаження та аналіз результатів чисельного розрахунку [3]; розробку методу виміру та аналізу імпульсного відклику баластного шару [4]; розробку частини математичної моделі роботи безстикової колії у горизонтальному напрямку [5]; розробку методу розрахунку розладнання геометрії колії та практичні розрахунки [6]; формулювання розрахункових залежностей поперечної стійкості рейкошпальної решітки від ступеня ущільнення баластного шару [7]; участь у розробці математичної моделі розладнання баластного шару під дією динамічних циклічних навантажень упродовж тривалого періоду часу [8]; аналіз літературних джерел щодо моделювання роботи баластного шару, а саме використання методу молекулярної динаміки [9]; аналіз літературних джерел щодо роботи баластного шару у безстиковій колії в кривих малого радіуса [10]; обґрунтування можливості використання динамічної інтерпретації імпульсного відклику баластного шару [11]; техніко-економічні розрахунки ефективності переходу з дерев'яних на залізобетонні шпали у кривих радіусом менше 350 м [12]; практичні рекомендації щодо параметрів ефективної роботи динамічних стабілізаторів колії [13]; розробку математичної моделі динамічного руху частинок баластного шару під дією вібраційного навантаження у поперечному напрямку відносно шпали [14]; розробку методу розрахунку розладнання геометрії колії [15]. В експериментальних дослідженнях на лабораторних стендах та натурних вимірах на колії автор брала участь як співвиконавець, що і знайшло відображення у відповідних науково-технічних звітах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертації доповідалися на 67-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2007 р.), XII Міжнародній конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2008 р.); 69-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2009 р.), 71-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2011р.). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на міжкафедральному науковому семінарі кафедр «Колія та колійне господарство», «Проектування і будівництво доріг», «Тунелі, основи і фундаменти» і «Будівельне виробництво та геодезія» (Дніпропетровськ, листопад 2012 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 15 наукових працях, у тому числі: 7 – у фахових виданнях (5 – з переліку, затверджених МОНмолодьспорту України; 2 – у фахових виданнях іноземних держав), 8 – у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та десяти додатків.

Основний текст роботи викладено на 150 сторінках. Дисертація містить усього 64 рисунки та 15 таблиць. 39 рисунків та 7 таблиць, розташованих на окремих

сторінках, займають 24 сторінки. Список літератури із 140 найменувань викладено на 14 сторінках.

Дисертацію оформлено у двох томах. Обсяг першого тому (основна частина) – 188 сторінок; обсяг другого тому (додатки) – 156 сторінок. Повний об'єм дисертації 344 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й задачі досліджень, відображена наукова новизна результатів, їх практичне значення.

У першому розділі проведено аналіз теоретичних та експериментальних досліджень роботи баластного шару під впливом ряду факторів; огляд підходів до моделювання роботи баластного шару та огляд існуючих феноменологічних формул осідань; аналіз впливу та взаємозв'язків факторів впливу на розладнання баластного шару; узагальнено наявні потенціали покращення роботи баластного шару з точки зору зменшення витрат життєвого циклу колії.

Вагомий вклад у розвиток досліджень роботи баластного шару внесли наступні вітчизняні вчені: Бромберг Е. М., Варизгін Е. С., Веріго М. Ф., Даніленко Е. І., Данілов В. М., Коган О. Я., Колос А. Ф., Леманський А., Лисюк В. С., Попов С. М., Прокудін І. В., Рибкін В. В., Соколовський В. В., Уманов М. І., Фрішман М. А., Цигельний П. М., Шахунянц Г. М. та ін.

Із закордонних дослідників слід виділити: Augustin S., Baeßler M., Bathurst P., Chang Y., Cholet C., Desai A., Gerber U., Gudehus, Guerin B., Guldenfels E., Fröhling J., Hettler A., Holtzendorff K., Holzfeind J., Hummitzsch R., Knothe K., Kruse H., Kienzer M., Klugar M., Lichtberger B., Mattner L., Müller-Boruttau F., Panadés E., Pita W., Popp K., Raymond M., Rücker F., Sato M., Savidis S., Schünemann G., Selig P., Shenton C., Stewart K., Stöcker H., Veit P., Waters K. та ін.

Критичний аналіз існуючих методів оцінки роботи баластного шару показав, що в їх основі, як правило, закладається критерій його напруженого стану без врахування постійної зміни стану та властивостей баласту протягом експлуатації колії. Огляд досліджень роботи баластного шару показав, що, на відміну від інших елементів колії, крім напруженого стану, на роботу баластного шару також мають вплив ряд важливих, але неврахованих факторів.

Основними неврахованими факторами є: вібраційний вплив взаємодії колії та рухомого складу; виконання робіт зі спорудження та утримання баластної колії; ступінь ущільнення баластного шару, якість земляного полотна та розладнання геометрії колії. Врахування зазначених факторів дозволить більш повно, в порівнянні з попередніми дослідженнями, оцінити роботу баластного шару в залізничній колії упродовж довготривалого розладнання геометрії колії внаслідок залишкових деформацій баластного шару при її експлуатації. При моделюванні роботи баластного шару необхідно приймати до уваги те, що баластний шар не є суцільним середовищем, і на його роботу суттєво впливають характеристики його окремих частинок. Крім того, в жодній з проаналізованих робіт не досліджувався вплив фактичного ступеня ущільнення баласту на розладнання баластного шару.

У другому розділі розроблена математична модель короткотривалих і довготривалих процесів взаємодії рухомого складу та залізничної колії, яка враховує:

динамічну взаємодію залізничної колії з рухомих складом; розладнання баластного шару при багатократній дії рухомого складу; нелінійність роботи підрейкових опор й баластного шару при взаємодії колії та рухомої квазістатичної сили; внутрішні динамічні процеси руху частинок щебеню та шпали у баластному шарі (рис. 1).

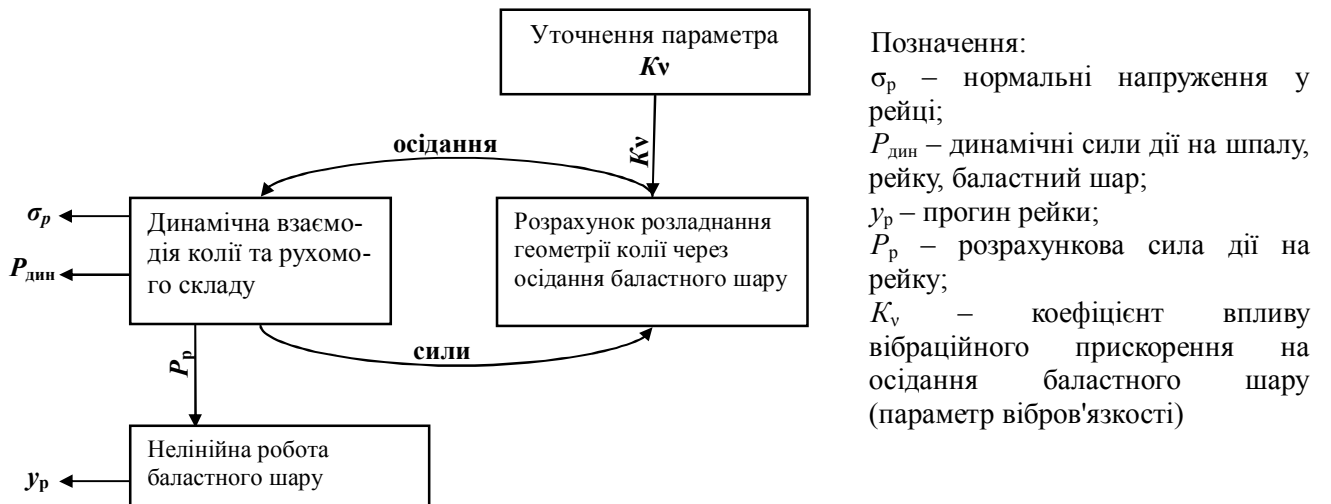
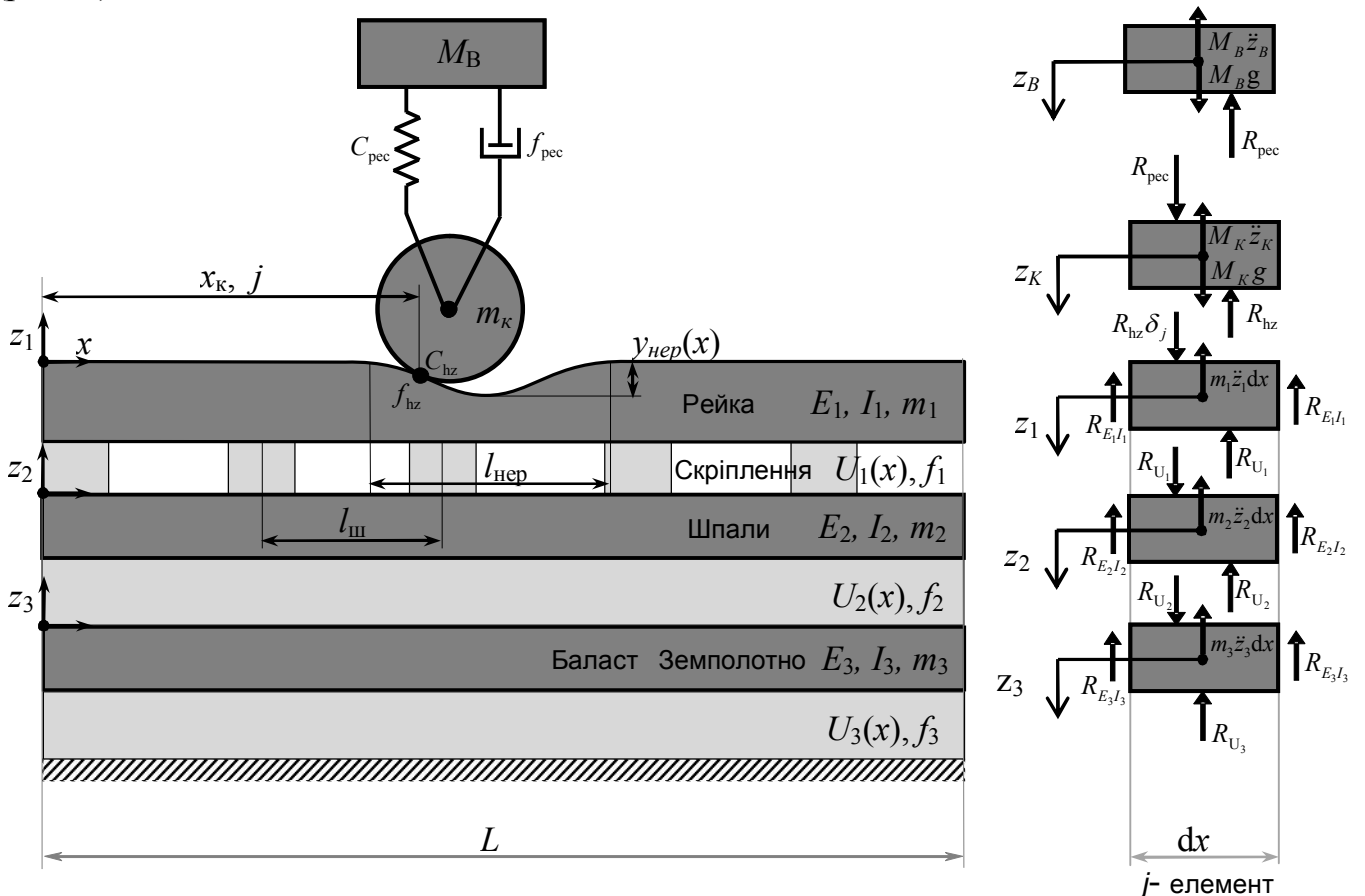


Рис. 1. Модель роботи баластного шару

Моделювання динамічної взаємодії колії та рухомого складу виконується шляхом розв'язку системи взаємозв'язаних диференційних рівнянь (1) згідно розрахункової схеми з трьох балок, з'єднаних Вінклерівською основою. Рухомий склад описується двомасовою системою з невіднесеною та наднесеною мас (рис. 2).



$$\left\{ \begin{aligned}
& M_B \frac{d^2 z_B(t)}{dt^2} + C_{pec} (z_B(t) - z_K(t)) + f_{pec} \left(\frac{dz_B(t)}{dt} - \frac{dz_K(t)}{dt} \right) = M_B g \\
& M_K \frac{d^2 z_K(t)}{dt^2} + C_{hz} (z_K(t) + y_{nep}(x_K) - z_1(x_K, t)) + f_{hz} \left(\frac{dz_K(t)}{dt} + \frac{dy_{nep}(x_K)}{dt} - \frac{dz_1(x_K, t)}{dt} \right) = \\
& = C_{pec} (z_B(t) - z_K(t)) + f_{pec} \left(\frac{dz_B(t)}{dt} - \frac{dz_K(t)}{dt} \right) + M_K g \\
& E_1 I_1 \frac{\partial^4 z_1(x, t)}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 z_1(x, t)}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_1(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} \right) + U_1(x) (z_1(x, t) - z_2(x, t)) = \\
& = \left(C_{hz} (z_K(t) + y_{nep}(x_K) - z_1(x_K, t)) + f_{hz} \left(\frac{dz_K(t)}{dt} + \frac{dy_{nep}(x_K)}{dt} - \frac{dz_1(x_K, t)}{dt} \right) \right) \\
& E_2 I_2 \frac{\partial^4 z_2(x, t)}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 z_2(x, t)}{\partial t^2} + f_2 \left(\frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial z_3(x, t)}{\partial t} \right) + U_2(x) (z_2(x, t) - z_3(x, t)) = \\
& = U_1(x) (z_1(x, t) - z_2(x, t)) + f_1 \left(\frac{\partial z_1(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} \right) \\
& E_3 I_3 \frac{\partial^4 z_3(x, t)}{\partial x^4} + m_3 \frac{\partial^2 z_3(x, t)}{\partial t^2} + f_3 \frac{\partial z_3(x, t)}{\partial t} + U_3(x) z_3(x, t) = \\
& = U_2(x) (z_2(x, t) - z_3(x, t)) + f_2 \left(\frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial z_3(x, t)}{\partial t} \right)
\end{aligned} \right. \quad (1)$$

Позначення, що прийняті у схемі на рис. 2 та системі диференціальних рівнянь (1): M_B – надресорна маса вагона, приведена до одного колеса; C_{pec} – жорсткість підвіски, приведена до одного колеса; f_{pec} – демпфування у підвісці, приведені до одного колеса; M_K – непідресорена маса вагона, приведена до одного колеса; C_{hz} – жорсткість у контакті колеса та рейки; f_{hz} – демпфування у контакті колеса та рейки; m_1, m_2, m_3 – приведені до осей відповідних балок вздовж колії маси рейки, шпал зі скріпленням, баластного шару із земляним полотном; z_B, z_K, z_1, z_2, z_3 – переміщення мас вагона, колеса, рейки, шпал зі скріпленням, баластного шару із земляним полотном відповідно; E_1, E_2, E_3 – приведені до осей відповідних балок модулі пружності відповідних елементів; I_1, I_2, I_3 – приведені до осей відповідних балок моменти інерції відповідних елементів; $U_2(x), U_3(x)$ – функції коефіцієнта постелі, який враховує можливість існування неоднорідної пружності у баласті чи земляному полотні, тобто силову нерівність; $U_1(x)$ – кусочна функція, яка показує зміну коефіцієнта постелі у шарі скріплення і є нульовою у міжшпальному просторі; f_2, f_3 – демпфування у з'єднуючих елементах шпал, баластного шару та земляного полотна; f_1 – демпфування у шарі скріплення, є нульовим у міжшпальному просторі; $l_{ш}$ – відстань між осями шпал; y_{nep} – глибина геометричної ізольованої нерівності на рейці; l_{nep} – довжина геометричної ізольованої нерівності на рейці; R_i – реакції в'язей між елементами системи та рухомого складу, що мають пружні та демпфуючі властивості; g – прискорення вільного падіння.

Розрахунок розвитку залишкових деформацій баластного шару виконується на основі моделювання роботи баластного шару під кожною шпалою (рис. 3), що описується елементами, які мають в'язко-пружні властивості та ґрунтується на моделі в'язкого тіла Ньютона, яке має властивості ущільнення зі збільшенням

залишкових деформацій. Пропонується удосконалити модель в'язкого тіла Ньютона врахуванням впливу вібрації на накопичення залишкових деформацій:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{P_{cm}(t) + P_d(t)}{\eta \cdot e^{(k-k_v \cdot |\ddot{S}(t)|) \cdot S(t)}}, \quad (2)$$

де $P_{cm}(t)$ – циклічне динамічне навантаження, що виникає внаслідок проїзду по колії вагона та прикладене до баласту; $P_d(t)$ – вібраційне динамічне навантаження, що передається на баластний шар, внаслідок нерівностей на колії чи колесі; η – параметр в'язкості, Н·с/м; $S(t)$ – залишкова деформація в момент часу t , м; k – параметр ущільнення, 1/м; $|\ddot{S}(t)|$ – прискорення частинок баласту, м/с²; k_v – коефіцієнт впливу вібраційного прискорення на розладнання баластного шару.

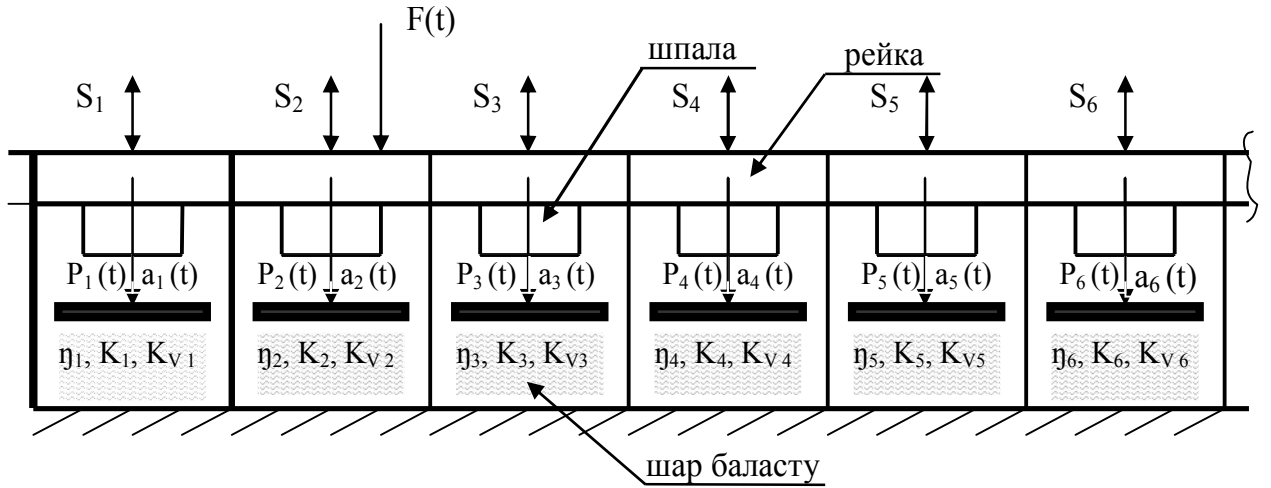


Рис. 3. Схема моделі прогнозування осідань колії внаслідок виникнення залишкових деформацій баластного шару вздовж колії

При заданій початковій геометричній нерівності з пропуском осей відбувається утворення та розвиток хвилі нерівності колії, яка, в свою чергу, викликає додаткове динамічне навантаження. Формальний запис функції взаємозв'язку напружено-деформованого стану колії, фізичних і геометричних характеристик колії та рухомого складу у певний період часу, що відповідає часу взаємодії при проходженні вагоном вертикальної нерівності колії, з осіданнями, відображається наступним чином:

$$P_i = f(y(x, t_i), P, H); \Delta y(x, \Delta t) = f(P_i(t_i), R); y(x, t_{i+1}) = y(x, t_i) + \Delta y(x, \Delta t), \quad (3)$$

де t_i – момент часу; P – характеристики рухомого складу; H – характеристики колії; R – характеристики баластного шару; Δt – крок часу.

Для знаходження коефіцієнта впливу вібраційного прискорення на осідання баластного шару моделюються динамічні процеси, які відбуваються всередині баластного шару під впливом вібраційного навантаження з допомогою методу молекулярної динаміки. Згідно з цим методом, кожна окрема частинка баластного шару розглядається як окреме тіло у контактній взаємодії із сусідніми частинками. Контактна взаємодія має в'язко-пружні властивості та властивості тертя. Динаміка системи визначається шляхом інтегрування законів Ньютона для поступального й обертального руху кожної частинки

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{F}_i / m_i; \quad \ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{J}_i^{-1} \mathbf{M}_i, \quad (4)$$

де r_i та u_i — компоненти радіус-вектора та кут повороту i -ої частинки; m_i та J_i^{-1} — її маса та момент інерції; F_i й M_i — вектори сили, прикладеної до центра мас і моменту сили відносно центра мас i -ої частинки.

Третій розділ присвячено розробці методу розрахунку розладнання геометрії колії, який враховує одночасний взаємний вплив основних груп факторів на роботу баластного шару. Запропоновано спосіб виміру ступеня ущільнення баласту, який ґрунтується на динамічній інтерпретації імпульсного відклику баластного шару, в основі якої лежить частотний аналіз.

В основі даного методу приймається розрахункова схема (рис. 4), згідно з якою розглядаються максимальні та мінімальні осідання баластного шару на переважаючій довжині хвилі нерівності $L_{\text{нер}}$, яка залежить від характеристик колії, рухомого складу та швидкості руху.

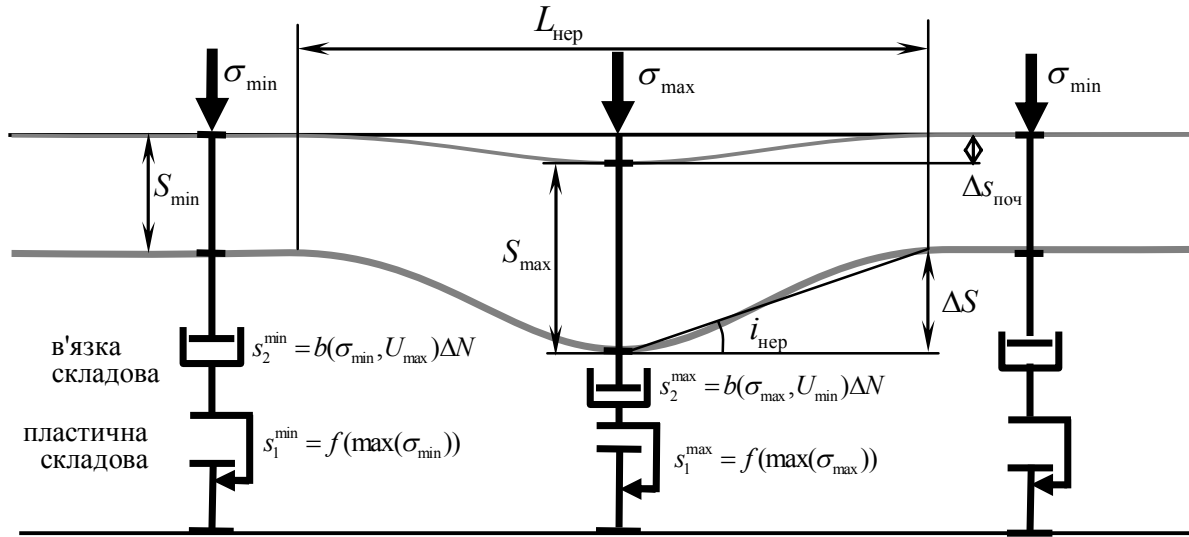


Рис. 4. Спрощена розрахункова схема для визначення нерівномірного осідання

Поведінка осідання описується сумуванням пластичної частини s_1 (незалежного від часу пластичного осідання, первинного осідання) та в'язкої частини s_2 (незалежного від часу в'язкого осідання, вторинного осідання): $s = s_1 + s_2$. Пластична частина осідання s_1 виникає раптово і, головним чином, у початковий період стабілізації колії: $s_1 = s_{\text{stab}} + s_{F_{\max}}$. Складова s_{stab} пов'язана із ступенем початкового ущільнення баластного шару динамічними стабілізаторами колії, що визначається запропонованим способом виміру та аналізу імпульсного відклику. Складова пластичного осідання $s_{F_{\max}}$ залежить від максимальної в історії навантажень сили. Взаємозв'язок початкових осідань та максимального навантаження представлено апроксимацією залежності поліномом другого степеню:

$$s_{F_{\max}} = 42,953 \cdot \max(\sigma_i)^2 + 5,6844 \cdot \max(\sigma_i), \quad (5)$$

де σ_i — розрахункове напруження у баластному шарі під шпалою, МПа.

В'язку складову наближено прийнято в лінійній залежності від кількості навантажень:

$$\Delta s_2 = b(\sigma_i, U) \Delta N, \quad (6)$$

де ΔN — приріст кількості циклів навантажень; $b(\sigma_i, U_s)$ — інтенсивність накопичення

залишкових деформацій, що залежить від напруження у баластному шарі σ_i під шпалою та модуля пружності земляного полотна U_s , і визначається як добуток відповідних складових: $b(\sigma_i, U_s) = b(\sigma_i) \cdot k_U(U_s)$. Складова від напружень у баласті визначається по емпіричній формулі, отриманій при обробці результатів експериментальних випробувань ВНИИЖТу для чистого щебеню фракцій 25-60 мм:

$$b(\sigma_i) = 1,981\sigma_i^3 + 0,199\sigma_i^2 + 0,029\sigma_i. \quad (7)$$

На основі аналізу літературних джерел автором запропонована емпірична залежність між модулем пружності земляного полотна та коефіцієнтом k_U :

$$k_U(U_s) = \frac{6000}{14U_s^{1,29} - 26} + 0,74. \quad (8)$$

Початкове нерівномірне осідання враховує три складові:

$$\Delta s_{\text{поч}} = \Delta s_u + \Delta s_{\text{stab}} + \Delta s_{\text{геом}}, \quad (9)$$

де $\Delta s_{\text{геом}}$ – початкова геометрична нерівність; Δs_{stab} – нерівність внаслідок нерівномірного осідання у фазі стабілізації колії; Δs_u – початкова якість колії через нерівнопружність земляного полотна, що дорівнює різниці прогинів при дії статичного навантаження P_{cm} на колію:

$$\Delta s_u = \left(\frac{k(U_z^{\min})}{2U_z^{\min}} - \frac{k(U_z^{\max})}{2U_z^{\max}} \right) \cdot P_{cm}, \quad (10)$$

де $U_z^{\min}$ та $U_z^{\max}$ – модулі пружності підрейкової основи, що розраховуються у залежності від пружностей скріплень, шпал, баласту та нерівнопружності земполотна $U_s^{\min}$, $U_s^{\max}$.

Збільшення нерівностей впродовж життєвого циклу відбувається за рахунок в'язкої складової Δs_2 . У даному методі приймається, що нерівність колії враховується у силі дії невіднесених мас через середній ухил нерівності $i_{\text{нер}}$. Початковий та середній ухили нерівності визначаються по сумарній різниці осідань $\Delta s_{\text{нер}} = s^{\max} - s^{\min} + \Delta s_{\text{поч}}$ та половині середньої довжини хвилі нерівності:

$$i_{\text{нер}}^{\text{поч}} = \frac{2\Delta s_{\text{поч}}}{L_{\text{нер}}}; \quad i_{\text{нер}} = \frac{2\Delta s_{\text{нер}}}{L_{\text{нер}}}. \quad (11)$$

Результуюча нерівність внаслідок нерівномірного осідання баластного шару, виражена ухилом, викликає додаткову динамічну дію, яка, в свою чергу, збільшує розладнання баластного шару. В алгоритмі розрахунку сила дії невіднесених мас коригується у кожному циклі розрахунку через врахування зміни ухилу нерівності $i_{\text{нер}}$. Довжина $L_{\text{нер}}$ хвилі нерівності залишається незмінною упродовж всього періоду навантажень.

Крім того, у методі враховано вплив виконання колійних робіт на роботу баластного шару, а саме: після виконання підбивки досягається певний ступінь покращення, але водночас відбувається зростання інтенсивності деформацій при багатократній підбивці через подрібнення баластного матеріалу. Ступінь покращення залежить від геометричного стану колії до підбивки. При цьому враховується, що з допомогою підбивки не можна отримати кращої якості, ніж

початкова якість колії, тобто нерівність через нерівнопружність земляного полотна Δs_U та нерівномірне осідання при одношаровій стабілізації колії Δs_{stab} . Покращення за допомогою підбивки автором запропоновано обчислювати за наступним виразом:

$$\Delta s_{підб} = k_{підб} \cdot (\Delta s_{нер} - \Delta s_U - \Delta s_{геом} - \Delta s_{stab}), \quad (12)$$

де $k_{підб}$ – коефіцієнт лінійної залежності, приймається рівним $0,5 \div 0,8$.

Вважається, що після пропуску вантажу до першого циклу підбивки баласт стає повністю стабілізований, і для всіх наступних підбивок вираз (12) набуває вигляду:

$$\Delta s_{підб} = k_{підб} \cdot (\Delta s_{нер} - \Delta s_U - \Delta s_{геом}). \quad (13)$$

Зростання інтенсивності розладнання після виконання підбивки залежить від ступеня пошкодження частинок матеріалу щебеню робочими органами підбивочних машин. На інтенсивність розладнання впливають механічні властивості опору частинок щебеню руйнуванню, які, в значній мірі, залежать від виду матеріалу баласту. На залізницях України використовується переважно щебеневий вид баласту із матеріалу граніт, який має високий опір подрібненню, тому для розрахунку наближено приймається збільшення інтенсивності на 20%.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням, на основі яких перевірена розроблена теоретична модель. Для цього виконано аналіз натурних вимірювань напружено-деформованого стану залізничної колії при різних епюрах розкладки залізобетонних шпал. Виконано лабораторні вимірювання імпульсного відклику баластного шару із використанням удосконаленого методу виміру та аналізу імпульсного відклику баластного шару, які дозволили зробити висновок про можливість використання такого методу під час натурних вимірювань на колії. Також здійснено натурні вимірювання імпульсного відклику баластного шару з подальшим аналізом на реальних ділянках колії з різним ступенем ущільнення баласту при різних комбінаціях проходження важких колійних машин. На основі статистичного аналізу лабораторних та натурних вимірів імпульсного відклику баластного шару (рис. 5) вибрано параметри динамічної інтерпретації сигналу,

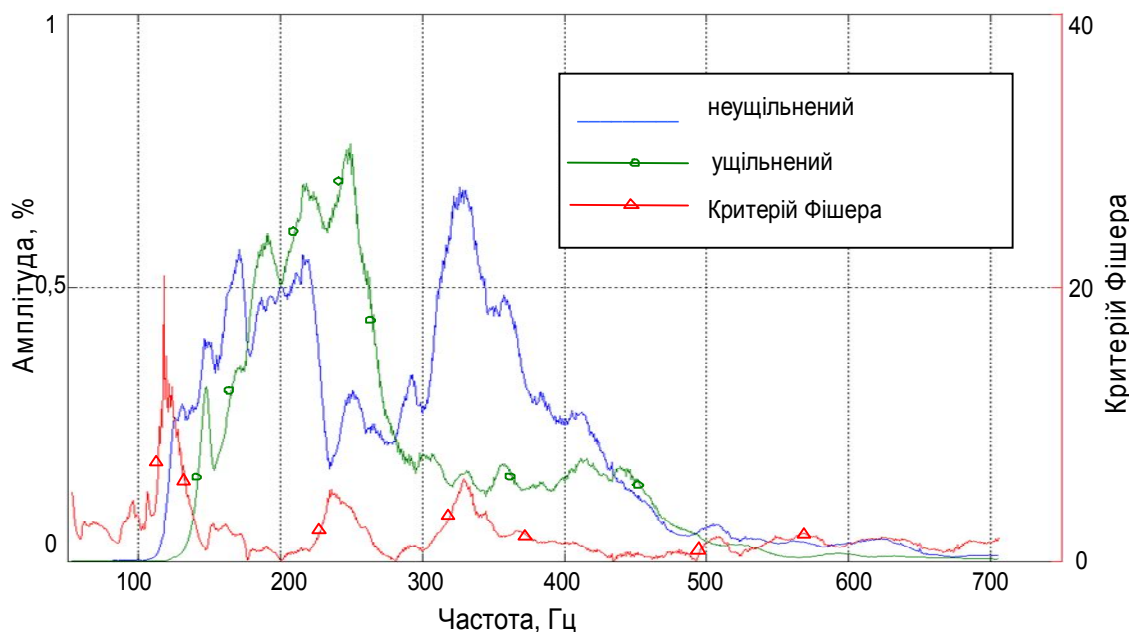


Рис. 5. Графіки усереднених значень періодограм сигналів для груп ущільненого і неущільненого баласту та значення критерію Фішера

які дозволяють надійно оцінювати щільність баластного шару, а саме: передній фронт хвилі, миттєва частота, початок спектру.

На ділянках з різним ступенем ущільнення баласту було виконано виміри залишкових осідань колії в період стабілізації до 1 млн. т. Це дозволило вперше отримати аналітичний зв'язок залишкових осідань колії в період стабілізації з параметрами імпульсного відклику (передній фронт хвилі, миттєва частота, початок спектру) при різних ступенях ущільнення, який закладається у метод розрахунку розладнання геометрії колії (рис. 6-7).

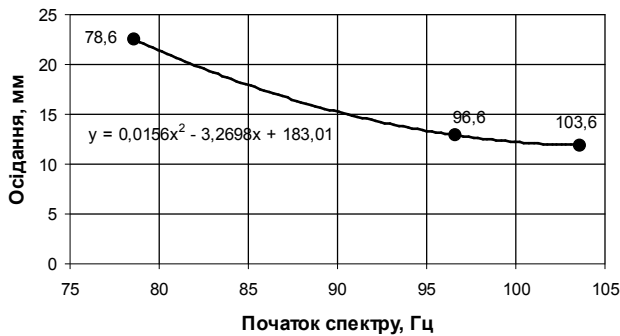


Рис. 6. Зв'язок осідань колії з початком спектру імпульсного відклику для різних комбінацій роботи машин

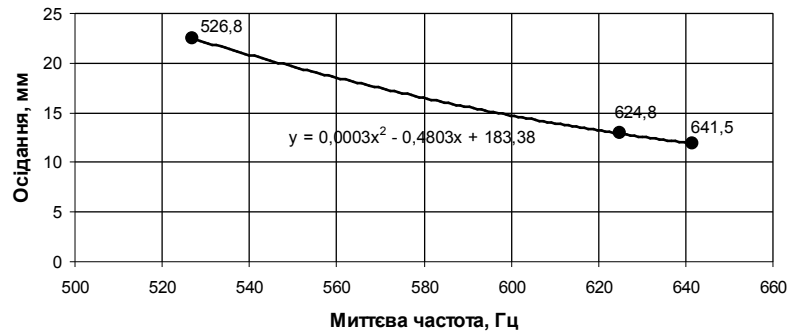


Рис. 7. Зв'язок осідань колії з миттєвою частотою імпульсного відклику для різних комбінацій роботи машин

Розроблено прототип пристрою, який дозволяє автоматизовано реєструвати та обробляти імпульсний відклик та без значних витрат часу отримувати ступінь ущільнення баластного шару після виконання ремонтно-колійних робіт.

П'ятий розділ присвячений практичним результатам дисертаційної роботи.

Виконано розрахунки розладнання геометрії колії по розробленому методу для переважного вантажного та пасажирського руху із врахуванням виконання підбивок баластного шару при досягненні максимально ймовірної глибини нерівності певної величини (рис. 8). Ця величина відповідає співвідношенню між кількістю нерівностей осідань II ступеня та III ступеня відхилень і вище при відомій величині максимально ймовірної

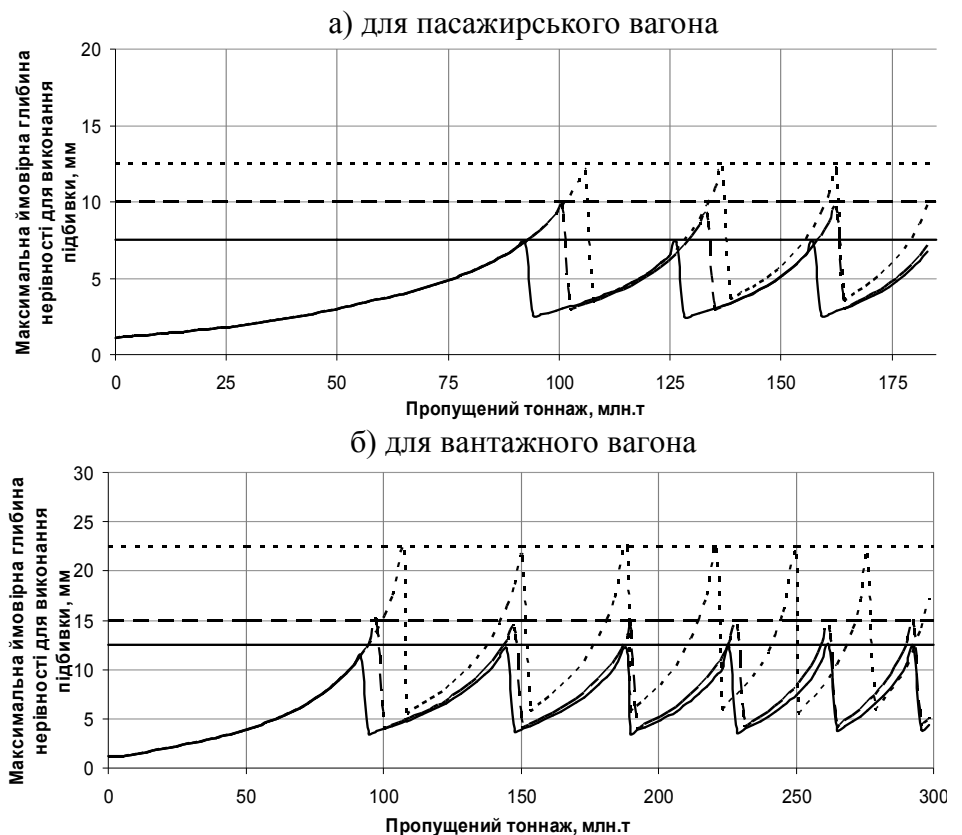


Рис. 8. Розвиток нерівності для пасажирського та вантажного вагона

глибини нерівності.

Встановлено, що існує оптимальна максимально ймовірна глибина вертикальної нерівності осідання колії, при якій середній інтервал між підбивками є найдовший. Рекомендована максимально ймовірна глибина нерівності для виконання підбивки з точки зору зменшення витрат на утримання геометрії колії становить для пасажирського вагона 10 мм, для вантажного вагона 12,5 мм (рис. 9).

З метою покращення роботи баластного шару встановлено раціональне співвідношення між умовами експлуатації, такими як швидкість руху та осьове навантаження, при якому середні інтервали між підбивками будуть найдовшими, що дозволяє зменшити експлуатаційні витрати на утримання залізничної колії (рис. 10).

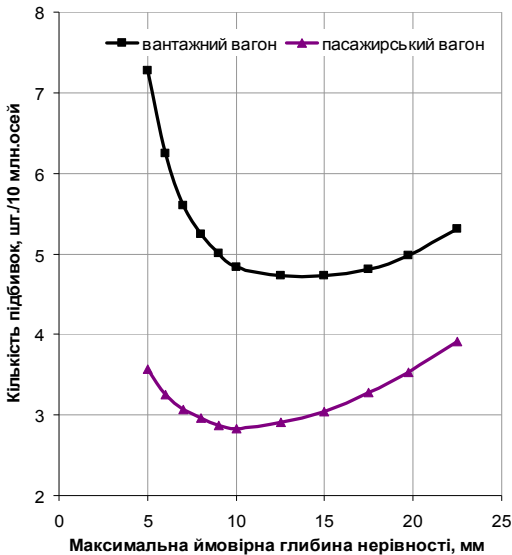


Рис. 9. Кількість підбивок при різній глибині нерівності для пасажирського та вантажного вагонів

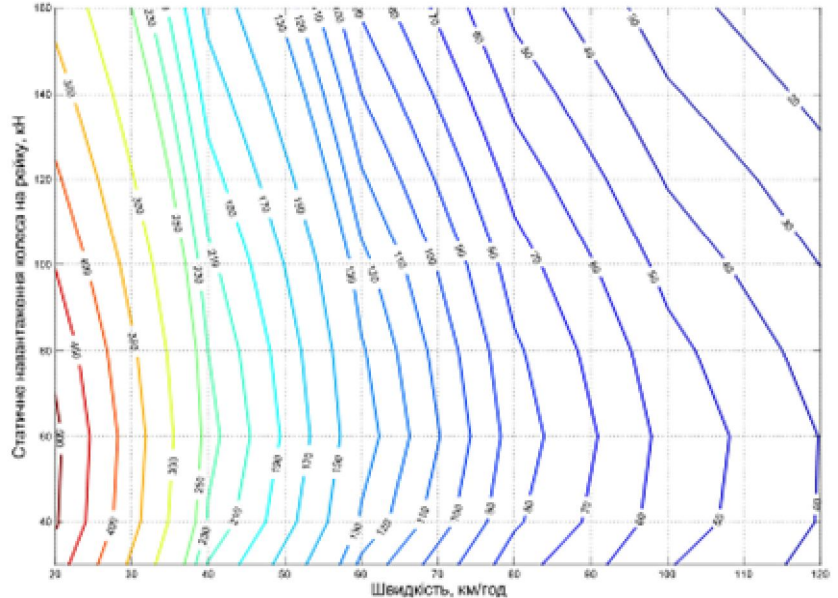


Рис. 10. Залежність середнього терміну між підбивками (млн. т) від швидкості руху та статичного навантаження для вантажного вагона

Із застосуванням розробленої моделі здійснено розрахунки напружено-деформованого стану колії при розладнанні геометрії колії внаслідок залишкових осідань баластного шару впродовж тривалого терміну експлуатації (рис.11-12).

Для оцінки впливу епюри шпал на роботу баластного шару виконано обчислення при різних варіантах епюри залізобетонних шпал. При переході від епюри шпал 1840 шт./км до зменшеної 1680 шт./км силова дія на баластний шар збільшується на 11% та пришвидшується розвиток нерівності на 35%.

На основі техніко-економічних розрахунків встановлено взаємозв'язок між вантажонапруженістю та

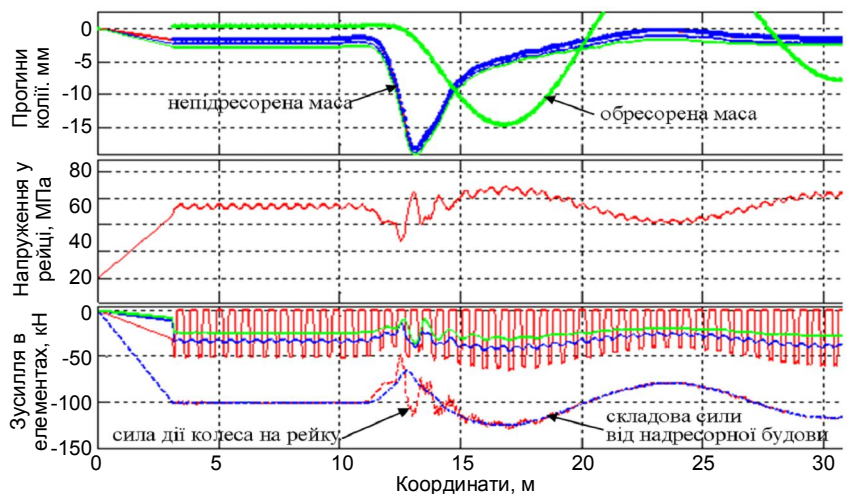


Рис. 11. Параметри взаємодії колії з рухомих складом на кінцевій нерівності при епюрі 1840 шт./км

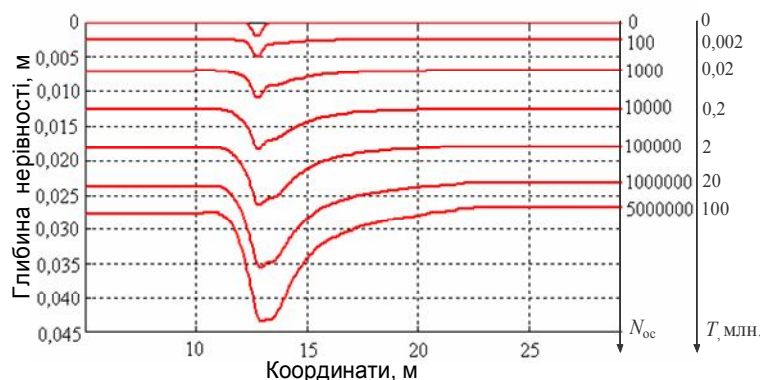


Рис. 12. Розвиток нерівності після пропуску 5 млн. осей при епюрі 1840 шт./км

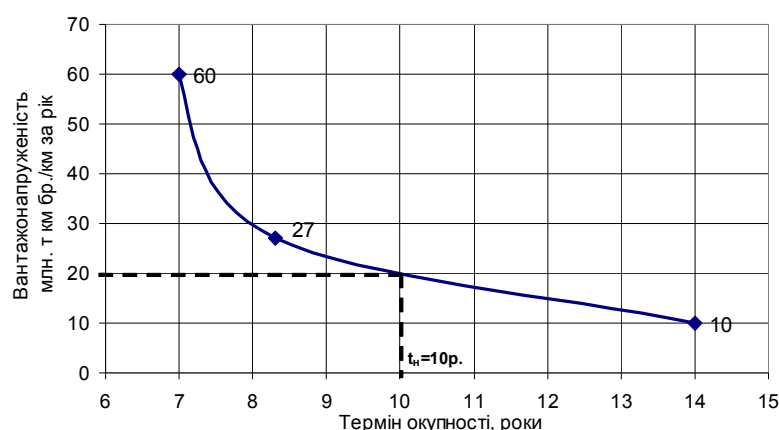


Рис. 13. Графік взаємозв'язку між вантажнапруженістю та терміном окупності епюри шпал 1680 шт./км

терміном окупності (рис.13), який показує, що розріджену епюру розкладки залізобетонних шпал 1680 шт./км економічно доцільно застосовувати при вантажнапруженості не більше 20 млн. т км бр./км за рік, при більшій вантажнапруженості слід використовувати епюру шпал 1840 шт./км.

Розрахунки динамічних процесів всередині баластного шару дозволили встановити вплив параметрів вібрації динамічного стабілізатора на ефективність стабілізації баластного шару, а саме: найефективнішою є горизонтальна вібрація з частотою 30-35 Гц; а товщина баласту, при якій інтенсивно відбувається стабілізація, складає не більше 20 см під шпалою. На рис. 14 зображені дерева розподілу навантажень при дії на колію динамічного стабілізатора до ущільнення та після дії упродовж 1 с динамічного горизонтального навантаження

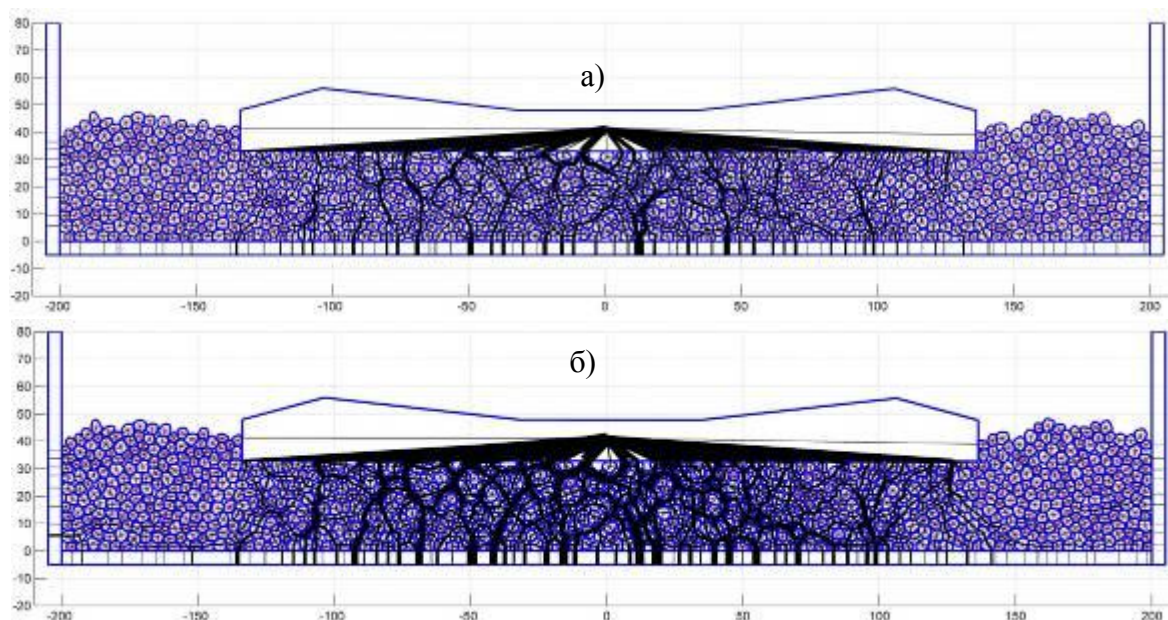


Рис. 14. Деревя розподілу навантажень:

- а) за дії статичного вертикального навантаження 27,7 кН до ущільнення;
- б) за дії статичного вертикального навантаження 27,7 кН після дії упродовж 1 с динамічного горизонтального навантаження з амплітудою 3,5 кН і частотою 35 Гц

з амплітудою 3,5 кН і частотою 35 Гц за дії статичного вертикального навантаження 27,7 кН на вузол скріплення. Бачимо, що до ущільнення вертикальне навантаження передається через окремі гілки та незначну кількість щебеню, а після вібраційного навантаження у дереві розподілу навантаження задіяно значно більше частинок щебеню.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних досліджень розв'язано важливу науково-технічну задачу підвищення ефективності експлуатації залізничної колії шляхом покращення роботи баластного шару. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення для колійного господарства залізничного транспорту України. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають у наступному.

1. На підставі проведеного аналізу встановлено взаємозв'язки між групами факторів рухомого складу, конструкції колії, факторів ремонту й утримання колії та осіданням баластного шару і розладнанням геометрії колії. Виділено внутрішні фактори, які безпосередньо впливають на пластичне і в'язке накопичення деформацій у баластному шарі та враховано зворотні зв'язки впливу нерівності на динамічні навантаження від рухомого складу і прискорення розладнання геометрії колії.

2. Вперше розроблений метод розрахунку розладнання геометрії колії дозволяє оцінити роботу баластного шару із врахуванням впливу груп факторів рухомого складу та конструкції колії, а також ряду інших важливих факторів, що чинять суттєвий вплив на роботу баластного шару, а саме: початкової якості колії; впливу утримання колії при зміні геометричного стану залізничної колії упродовж терміну її експлуатації. Даний метод може бути використаний при плануванні робіт з утримання геометрії колії та підбору раціональних умов експлуатації.

3. Із використанням запропонованого методу розрахунку розладнання геометрії колії дана рекомендація раціональних величин вертикальних нерівностей з точки зору утримання баластного шару, при яких призначаються роботи з підбивки колії. При переважному пасажирському русі найдоцільніше призначати роботи з виправлення колії у профілі при досягненні максимально ймовірної глибини нерівності 10 мм, для переважного вантажного руху найменша кількість підбивок буде при максимально ймовірній глибині нерівності 12,5 мм.

4. Встановлено раціональне співвідношення між середніми інтервалами між підбивками та умовами експлуатації (такі як швидкість руху та осьове навантаження) з врахуванням конструкції колії, що дозволяє зменшити експлуатаційні витрати на утримання залізничної колії.

5. Вперше отримано аналітичні залежності зв'язку залишкових осідань колії у фазі стабілізації з параметрами імпульсного відклику баластного шару при різних ступенях ущільнення, що дозволяє визначити складову початкової якості колії за допомогою вимірів імпульсного відклику баластного шару та його динамічної інтерпретації.

6. Із використанням запропонованого удосконаленого методу визначення ступеня ущільнення баластного шару при виконанні ремонтів колії важкими

колійними машинами обґрунтовано ефективність повторної стабілізації колії динамічним стабілізатором колії та неефективність третього проходу динамічного стабілізатора, а також сформульовано залежність між ступенем ущільнення баластного шару та осіданням колії у фазі стабілізації, що є однією зі складових її початкової якості.

7. Розроблена математична модель дозволила визначити вплив параметрів вібрації динамічного стабілізатора на ефективність стабілізації баластного шару, а саме: найефективнішою є горизонтальна вібрація з частотою 30-35 Гц; а товщина баласту, при якій інтенсивно відбувається стабілізація, складає не більше 20 см під шпалою.

8. Із застосуванням розробленої моделі та техніко-економічних розрахунків встановлено, що розріджену епюру розкладки залізобетонних шпал 1680 шт./км економічно доцільно застосовувати при вантажонапруженості не більше 20 млн. т км бр./км за рік, при більшій вантажонапруженості слід використовувати епюру шпал 1840 шт./км.

Основні положення та результати дисертації опубліковано у наступних роботах:

1. Уманов М. И. Допускаемые скорости движения поездов на участках пути отремонтированных с использованием современных путевых машин. / М. И. Уманов, А. Г. Рейдемейстер, О. С. Набоченко, Н. В. Халипова // Удосконалення конструкції залізничної колії та системи ведення колійного господарства. – Харків, 2008. – Вип. 91. – С. 48-54.

2. Сисин М. П. Дослідження впливу пружності скріплення на вібраційну дію рухомого складу на баластний шар / М. П. Сисин, О. С. Набоченко // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: "Каменярь", 2009. – Вип. 8. – С. 542-554.

3. Рибкін В. Моделювання руху частинок баластного шару залізничної колії під дією вібраційного навантаження на рейки / В. Рибкін, М. Сисин, О. Набоченко // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології: Науковий збірник. – Львів, 2009. – Вип. 10. – С. 113-122.

4. Рыбкин В. Определение степени уплотнения балластного слоя путем динамического и кинематического анализа проходящей в нем акустической волны / В. Рыбкин, У. Гербер, О. Набоченко, М. Сысын // Sborník přednášek. Železniční Dopravní Cesta. VOŠ a SPŠ stavební. Děčín, 17.-18. února 2010. – S. 123-130.

5. Рибкін В. В. Моделювання роботи безстикової колії у кривих радіусом менше 350 м / В. В. Рибкін, М. П. Сисин, О. С. Набоченко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 36. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 111-116.

6. Nabochenko O. Die Instandhaltung der Bettung. / Ing. Olga Nabochenko, Ph.D. Mykola Sysyn, Dr-Ing. Ulf Gerber, prof. Viktor Rybkin // Sborník přednášek. Železniční Dopravní Cesta 2011. VOŠ a SPŠ stavební. Děčín, 23.-24. února 2011. – S. 23-32.

7. Набоченко О. С. Визначення поперечної стійкості рейко-шпальної решітки шляхом вимірювання ступеня ущільнення баластного шару. / О. С. Набоченко, М. П. Сисин // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 1. – С. 52-55.

Додаткові праці:

8. Рибкін В. В. Вплив епюри залізобетонних шпал на розладнання баластного шару / Рибкін В. В., Настечки М. П., Набоченко О. С., Сисин М. П. // [Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 67-ї Міжнародної науково-практ. конф.]. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 207-208.

9. Рибкін В. В. Моделювання руху частинок баластного шару із використанням методу молекулярної динаміки / Рибкін В. В., Сисин М. П., Набоченко О. С. // [Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 67-ї Міжнародної науково-практ. конф.]. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 208-209.

10. Сисин М. П. Моделювання роботи безстикової колії у поперечному напрямку під дією поздовжніх температурних сил / М. П. Сисин, О. С. Набоченко. // [Проблеми механіки залізничного транспорту: тези доп. 12-ї Міжнародної наукової конф.]. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 146.

11. Набоченко О. С. Оцінка якості ущільнення баластного шару за допомогою спектрального аналізу його імпульсного відклику / О. С. Набоченко, М. П. Сисин, М. І. Уманов, С. А. Гришечкін // [Проблеми механіки залізничного транспорту: тези доп. 12-ї Міжнародної наукової конф.]. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 112.

12. Настечик М. П. Техніко-економічне обґрунтування можливості використання колії на залізобетонних шпалах у кривих радіусом менше 350 м. / М. П. Настечик, М. П. Сисин, О. Чорноволенко, О. С. Набоченко, М. А. Арбузов // [Проблеми механіки залізничного транспорту: тези доп. 12-ї Міжнародної наукової конф.]. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 113.

13. Уманов М. И. Определение допускаемых скоростей движения поездов по участкам пути, отремонтированным с использованием динамических стабилизаторов пути разных конструкций / М. И. Уманов, В. В. Цыганенко, А. Г. Рейдемейстер, Д. Н. Курган, С. А. Гришечкин, Н. П. Сысын, О. С. Набоченко, Н. Г. Ренгач, Д. Б. Макаров (ДИИТ), Н. В. Халипова (АМСУ). // [Проблеми механіки залізничного транспорту: тези доп. 12-ї Міжнародної наукової конф.]. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 157.

14. Рибкін В. В. Моделювання розвитку залишкових деформацій у баластному шарі залізничної колії під дією вібраційного навантаження на рейки / Рибкін В. В., Сисин М. П., Набоченко О. С. // [Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 69-ї Міжнародної науково-практ. конф.]. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 164-165.

15. Гербер У. Исследование изменения вертикальной геометрии пути вследствие расстройств балластного слоя. / Гербер У., Рыбкин В. В., Набоченко О. С., Сысын Н. П. // [Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 71-ї Міжнародної науково-практ. конф.]. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 168-170.

АНОТАЦІЯ

Набоченко О. С. Підвищення ефективності роботи щебеневого баластного шару залізничної колії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія, Дніпропетровський національний

університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2012.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності експлуатації баластної залізничної колії з точки зору покращення роботи баластного шару шляхом встановлення раціональних параметрів конструкції колії та рухомого складу, експлуатаційних умов при оптимальних міжремонтних інтервалах.

Виконано аналіз впливу та взаємозв'язків факторів впливу на розладнання баластного шару.

Розроблено модель короткотривалих та довготривалих процесів взаємодії рухомого складу та залізничної колії, яка враховує розладнання баластного шару при багатократній дії рухомого складу та внутрішні динамічні процеси руху частинок щебеню та шпали у баластному шарі. Розроблено метод розрахунку розладнання геометрії колії, який враховує одночасний взаємний вплив основних груп факторів на роботу баластного шару.

Запропоновано спосіб виміру ступеня ущільнення баласту, який ґрунтується на динамічній інтерпретації імпульсного відклику баластного шару. Виконано лабораторні та натурні вимірювання імпульсного відклику баластного шару з подальшим аналізом на реальних ділянках колії з різним ступенем ущільнення баласту при різних комбінаціях проходження важких колійних машин.

Сформульовано практичні рекомендації щодо вибору епюри шпал в залежності від вантажонапруженості; ефективних параметрів роботи динамічних стабілізаторів колії та технології виконання робіт; раціонального співвідношення між швидкістю руху та осьовим навантаженням з точки зору роботи баластного шару та встановлено раціональні значення критерію призначення виконання підбивок баластного шару для пасажирського та вантажного руху.

Ключові слова: баластний шар, розладнання геометрії колії, ступінь ущільнення баластного шару, динамічна інтерпретація імпульсного відклику, еюра шпал.

АННОТАЦІЯ

Набоченко О. С. Повышение эффективности работы щебеночного балластного слоя железнодорожного пути. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2012.

Диссертация посвящена повышению эффективности эксплуатации балластного железнодорожного пути с точки зрения улучшения работы балластного слоя путем установления рациональных параметров конструкции пути и подвижного состава, эксплуатационных условий при оптимальных межремонтных интервалах.

Выполнен анализ влияния и взаимосвязей факторов влияния на расстройство балластного слоя и обобщены имеющиеся потенциалы улучшения работы балластного слоя с точки зрения уменьшения затрат жизненного цикла пути.

Разработана модель кратковременных и длительных процессов взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, которая учитывает расстройство балластного слоя при многократном воздействии подвижного состава, нелинейность работы подрельсовых опор и балластного слоя при взаимодействии пути и движущейся квазистатической силы, а также внутренние динамические процессы движения частиц щебня и шпалы в балластном слое. Моделирование динамических процессов, происходящих внутри балластного слоя под воздействием вибрационной нагрузки, выполняется с использованием метода молекулярной динамики. Согласно этому методу, каждая отдельная частица балластного слоя рассматривается как отдельное тело в контактом взаимодействии с соседними частицами, которое имеет вязко-упругие свойства и свойства трения.

Разработан метод расчета расстройства геометрии пути, учитывающий одновременное взаимное влияние основных групп факторов на работу балластного слоя: факторов конструкции пути, подвижного состава, эксплуатационных условий и факторов содержания пути. В данном методе учтено влияние выполнения путевых работ на работу балластного слоя, а именно: после выполнения подбивки достигается определенная степень улучшения геометрии пути, но одновременно происходит рост интенсивности деформаций при многократной подбивке из-за измельчения балластного материала. Степень улучшения зависит от геометрического состояния пути до подбивки. При этом учитывается, что с помощью подбивки нельзя получить качество лучше, чем начальное качество пути, т.е. неровность из-за неравноупругости земляного полотна и неравномерной осадки при однослойной стабилизации пути. На основании знания механизмов расстройства балластного слоя и факторов, которые на него влияют, прогнозируется процесс расстройства геометрии пути и, соответственно этому, определяются рациональные сроки текущего содержания и ремонтов пути.

Предложен способ измерения степени уплотнения балласта, основанный на динамической интерпретации импульсного отклика балластного слоя, в основе которого лежит частотный анализ. Выполнено лабораторные и натурные измерения импульсного отклика балластного слоя с последующим анализом на реальных участках пути с разной степенью уплотнения балласта при различных комбинациях прохождения тяжелых путевых машин. Вследствие статистического анализа лабораторных и натурных измерений импульсного отклика балластного слоя выбрано параметры динамической интерпретации сигнала, которые позволяют надежно оценивать плотность балластного слоя, а именно: передний фронт волны, мгновенную частоту, начало спектра. На основании натурных измерений деформаций пути получены аналитические зависимости связи остаточных просадок пути в фазе стабилизации с параметрами импульсного отклика балластного слоя при различных степенях уплотнения.

Сформулированы практические рекомендации по выбору эпюры шпал в зависимости от грузонапряженности; эффективным параметрам работы динамических стабилизаторов пути и технологии выполнения работ; рациональному соотношению между скоростью движения и осевой нагрузкой с точки зрения работы балластного слоя и установлены оптимальные значения критерия назначения выполнения подбивок балластного слоя для пассажирского и грузового

движения; дана рекомендация рациональных величин вертикальных неровностей с точки зрения содержания балластного слоя, при которых назначаются работы по подбивке пути.

Ключевые слова: балластный слой, расстройство геометрии пути, степень уплотнения балластного слоя, динамическая интерпретация импульсного отклика, эпюра шпал, метод молекулярной динамики, вибрационная динамическая нагрузка, динамические стабилизаторы пути.

ABSTRACT

Nabochenko O. S. Increasing of efficiency of railway broken stone ballast. – Manuscript.

Thesis for the degree of Ph.D. in the specialty 05.22.06 – railway track, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2012.

The thesis is dedicated to increasing the efficiency of operation of the railway ballast in the point of view of ballast improvement by means of establishment of rational track design parameters and operating conditions.

The analysis of effects and interactions of factors on the ballast work is done.

A model of short-term and long-term processes of interaction between the rolling stock and railway track is developed. The model takes into account the ballast deterioration under the rolling stock loading and the internal dynamic processes of particles of ballast and sleepers in the ballast layer.

A method of calculation of railway track geometry deterioration is completed. The method takes into account the simultaneous mutual influence of the main groups of factors.

A method for measuring the degree of compaction of ballast is proposed. The method is based on a dynamic interpretation of the ballast impulse response, which is grounded on frequency analysis. Laboratory and field measurements of the ballast impulse response with the following analysis on real track sections with a different degree of ballast compaction are fulfilled.

Practical recommendations are proposed: the sleeper layout depending on the traffic density; the effective parameters of the dynamic stabilizers; the optimal ratio between the train velocity and axial load depending on the ballast maintenance intervals.

Keywords: ballast layer, railway track geometry deterioration, degree of ballast compaction, dynamic interpretation of the ballast impulse response, sleeper layout.

НАБОЧЕНКО ОЛЬГА СЕРГІЇВНА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЩЕБЕНЕВОГО
БАЛАСТНОГО ШАРУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат паперу 60x48 1/16. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100.

Підписано до друку 06.03.2013р.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010