

581

6242

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

БОНДАРЕНКО ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 625.121.033.037

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ  
КОЛІЇ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ**

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2006

НТБ  
ДНУЗТ

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана на кафедрі «Колія та колійне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

**Науковий керівник** — доктор технічних наук, професор

**ДАНОВИЧ Віктор Данилович,**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, професор кафедри «Колія та колійне господарство».

**Консультант** — доктор технічних наук, професор

**РИБКІН Віктор Васильович,**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, завідувач кафедри «Колія і колійне господарство».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор

**Гончарук Сергій Миронович,**

Одеський національний морський університет, професор кафедри «Експлуатація морських портів»;

кандидат технічних наук, доцент

залізничного транспорту

ку України, м. Харків, доцент кафедри

ки і технологій транспорту, кафедра залізниць і споруд» Міністерства Київ.

на засіданні спеціалізованої вченої ради університеті залізничного транспорту імені а, 2, ауд. 314, м. Дніпропетровськ, 49010. тровського національного університету

**НТБ  
ДНУЗТ**

**М. О. Костін**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Вступ.** Залізничний транспорт є важливою складовою частиною економіки України, бо забезпечує реалізацію приблизно 75% вантажообігу і більше 40% пасажирообігу від всіх транспортних перевезень країни. Крім того, українські залізниці є основною транспортною ланкою, що з'єднує Україну із Західною і Центральною Європою, Росією і країнами Кавказу. Необхідність розвитку та модернізації залізничного транспорту України при її інтеграції в транспортні системи Європи і Азії зумовлює потребу упровадження швидкісного руху на основних вантажних та пасажирських напрямках залізниць України і подальшого підвищення вагової норми вантажних поїздів.

Зростання навантаження на залізничну колію, у зв'язку з підвищенням швидкості руху та вагової норми вантажних поїздів, вимагає уточнення методів розрахунку залізничної колії. Одним з напрямів таких уточнень є підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи. Визначення характеристик залізничної колії з використанням усереднених дискретних значень модуля пружності підрейкової основи для ділянок з однаковою конструкцією верхньої будови колії, але розташованих на земляному полотні, що складається з різних ґрунтів, дає рівнозначні характеристики міцності. Проте їх фактичні значення можуть істотно відрізнятися від розрахункових даних ділянок, оскільки несуча здатність ґрунтів не однакова і при однакових навантаженнях їх деформативність різна.

Завданням даної дисертаційної роботи є дослідження процесів, пов'язаних з визначенням достовірних значень модуля пружності підрейкової основи колії, з урахуванням всіх факторів, що суттєво впливають на зазначену величину і з можливістю використання цих уточнень для оцінки працездатності залізничної колії.

**Актуальність теми.** В умовах ринкової економіки від підприємств потрібна зміна підходу до оцінки економічної ефективності інвестицій і вибору варіантів здійснення капітальних вкладень, у тому числі і в колійному господарстві. Крім того, через територію України проходять головні транс'європейські транспортні коридори, що зумовлює необхідність впровадження швидкісного руху на основних напрямках залізниць України та перспективного рухомого складу з підвищеним осьовим навантаженням, тому диференційований підхід при встановленні умов експлуатації колії неминучий. В той же час для визначення допустимих умов експлуатації рухомого складу необхідні достовірні параметри міцності та надійності колії в функціональній залежності від розрахункових параметрів підрейкової основи.

Наведене вище вказує на актуальність розробки нової розрахункової методики, яка враховувала б фактичні параметри конструкції колії. Цим питанням і присвячена дисертація.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації пов'язана з планом виконання науково-дослідних робіт кафедри «Колія і колійне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна в галузі удосконалення технічних норм з утримання колії і розробці технічної документації. Автор дисертації брала участь в науково-дослідних роботах, що виконувались за

Дніпропетровського національного  
університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

завданням Головного управління колійного господарства Укрзалізниці за темою “Проведення динаміко-міцнісних випробувань колії на залізобетонних шпалах з пружним скріпленням типу КПП, рейками UIC60 та розробці рекомендацій по встановленню швидкостей руху поїздів” (державний реєстраційний номер 0103U007770), договір № 205/03-9.03-ЦТех 53.148 від 25.04.2003 р.), а також у розробці нормативно-технічного документа «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117 затвердженого наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ.

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи шляхом розробки методики визначення модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, що враховує наявність всіх складових конструкції колії.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі.

1.Провести системний аналіз існуючих методів визначення напружено-деформованого стану залізничної колії та розробити модель конструкції залізничної колії для дослідження деформативних процесів підрейкової основи при зовнішній дії рухомого складу.

2.Виконати комплексну оцінку впливу різних факторів на величину модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині і розробити методику розрахунку модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині для інженерних розрахунків колії.

3.Провести експериментальну перевірку розробленої методики та відкоригувати аналітичні вирази і значення відповідних коефіцієнтів для розрахунку колії на міцність з урахуванням використання запропонованої методики.

4.Розробити пропозицію по оцінці деформативної працездатності залізничної колії, забезпечуючи необхідний рівень її надійності, як на стадії проектування, так і експлуатації.

5.Розробити основні положення і методику розрахунку параметрів стабілізуючого шару, що забезпечує необхідну несучу здатність основної площадки, пружні і залишкові деформації земляного полотна в нормативних межах.

**Об'єкт досліджень** – процес деформативності колії, як системи закономірностей, зв'язків, відносин, у рамках якої розглядалася проблема взаємодії колії і рухомого складу.

**Предмет досліджень** - параметри деформативності залізничної колії в пружній стадії її роботи.

**Методи досліджень.** В роботі використано комплексний метод досліджень, який включає аналітичну і експериментальну частини. Для аналітичних досліджень застосовували метод математичного моделювання на основі використання положень методу кінцевих елементів (МКЕ). Модуль пружності підрейкової основи отримали за допомогою модульного вагону, напруження в рейках вимірювали методом трьох точок та методом Шлума за допомогою тензодатчиків, переміщення рейок та шпал вимірювали за допомогою прогномірів. Обробку експериментальних даних проводили на ПЕОМ, використовуючи методи математичної статистики.

НТБ  
ДНУЗТ

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в такому.

1. Вперше розроблена модель конструкції залізничної колії, що дозволяє при моделюванні зовнішній дії рухомого складу виконувати дослідження деформативних процесів підрейкової основи з використанням методу кінцевих елементів, яка відрізняється від існуючих моделей більш досконалим врахуванням фізико-конструктивних параметрів колії, що дозволяє більш точно досліджувати деформативний процес.

2. Встановлено аналітичні залежності між фізико-конструктивними факторами і значеннями модуля пружності підрейкової основи колії та розроблена нова методика визначення розрахункових значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині при розв'язанні задачі оптимального устрою залізничної колії.

3. Обґрунтовано теоретичні положення і принципи розрахунку характеристик стабілізуючого шару, який забезпечує необхідну несучу здатність основної площадки, пружні і залишкові деформації земляного полотна в нормативних межах, а також дозволяє визначити параметри ефективного використання підбаластного щелевеного шару.

4. Вперше запропоновано додаткові критерії оцінки працездатності колії, що враховують деформативні властивості залізничної колії і забезпечують необхідний рівень її надійності як на стадії проектування, так і експлуатації.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Встановлені в роботі нові наукові положення є базою для вирішення важливої задачі – підвищення ефективності експлуатації залізничної колії при дотриманні нормативів її устрою і утримання.

Використання інженерної методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи у вертикальній площині та оцінки деформативності залізничної колії дозволяє у кожному конкретному випадку залежно від конструктивних особливостей устрою колії встановлювати раціональний режим експлуатації даної ділянки, і, навпаки, дає можливість для заданих умов експлуатації визначати оптимальну за критерієм деформативності конструкцію колії, або заходи щодо її посилення, які прийняті до використання на Придніпровській залізниці.

На основі експерименту і теоретичних розрахунків дані рекомендації Головному управлінню колійного господарства Укрзалізниці по використанню рейок UIC60 на мережі залізниць України.

Отримані діапазони значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині використані при підготовці даних у «Правилах розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується адекватно обраним математичним апаратом, проведенням експериментальних досліджень з достатньою збіжністю одержаних теоретичних та практичних результатів, позитивними результатами використання розробок на діючій залізничній колії.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, розробки й результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: у роботі [1] - отримання виразів переміщень під

шпальної пружно-в'язкої основи, написана програма для ПЕОМ розрахунку пружних ліній переміщень поверхні основи та виконані розрахунки переміщень в різні моменти часу в різних перерізах під дією динамічної сили; у роботах [2, 7, 8] - розробка моделі конструкції колії при зовнішній дії рухомого складу з використанням методу кінцевих елементів; у [3, 6, 9] - чисельна оцінка ступеня впливу на деформативність колії різних факторів: роду ґрунту і його стану; роду, товщини і стану баластного шару; типу, споря і стану шпал; типу скріплення; у [4, 10, 12] - корегування аналітичних виразів і значень відповідних коефіцієнтів для розрахунку колії на міцність з урахуванням використання запропонованої методики; у роботі [13] – ідея і методика оцінки стану колії за додатковим критерієм, враховуючим її деформативні властивості; розробка основних положень і принципів методики розрахунку характеристик стабілізуючого шару; визначення параметрів ефективного використання підбаластового ідебесневого шару для посилення конструкції колії. Роботи [5, 11] написані без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації докладалися на: 10-ій Міжнародній конференції по проблемах механіки залізничного транспорту (Дніпропетровськ, березень 2000 р.); 4-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Москва, червень 2001 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава», присвяченій 90-річчю професора М.А. Фришмана (Дніпропетровськ, жовтень 2003 р.); Першій науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління» (Київ, грудень 2003 р.); 11-ій Міжнародній конференції по проблемах механіки залізничного транспорту (Дніпропетровськ, травень 2004 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и инженерных сооружений. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований», присвяченій 100-річчю з дня народження професора Г.М.Шахунянца (Москва, жовтень 2004 р.); 65 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Дніпропетровськ, травень 2005 р.). Повністю дисертаційна робота докладалася на науково-практичному міжкафедральному семінарі кафедр «Колія і колійне господарство» і «Проектування, будівництво доріг і геодезія» (Дніпропетровськ, жовтень 2005 р.), на кафедральному науковому семінарі кафедри «Реконструкція і експлуатація залізниць і споруд» Київського університету економіки і технологій транспорту (Київ, 2006 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані в 13-ти наукових працях, у тому числі: 7- у фахових виданнях, 6- у матеріалах конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Повний обсяг складає 248 сторінок друкованого тексту, в тому числі: 55 рисунків викладено на 26 сторінках, 39 таблиць - на 23 сторінках, список літератури з 149 найменувань займає 16 сторінок, та 5 додатків викладено на 50 сторінках.

НТБ  
ДНУЗТ

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета й задачі досліджень, відображена наукова новизна результатів, їх практичне значення.

У *першому розділі* узагальнено багаторічний досвід досліджень напружено-деформованого стану колії. Проведено ретроспективний огляд удосконалювання розрахункової схеми, методики врахування імовірного характеру діючих на колію факторів, методів оцінки працездатності колії. Приведено методики експериментального визначення напружено-деформованого стану колії.

З моменту виникнення залізниць у всіх промислово розвинених країнах проводились дослідження й досліди щодо міцності колії. Комплексні дослідження з проблем взаємодії колії і рухомого складу в різні роки виконували і виконують науково-дослідні інститути і вищі навчальні заклади. У роботах М.Ф. Веріго, В.Д. Дановича, О.П. Єршкова, О.Я. Когана, В.А. Лазаряна, М.А. Фрішмана, Г.М. Шахунянца, М.А. Чернишова та інш. розглянуті питання взаємодії колії і рухомого складу. Дослідження В.Г. Альбрехта, Л.С. Блажко, Ю.Д. Волошко, Е.І. Данілевко, Г.Г. Коньшина, В.С. Лисюка, В.О. Певзнера, В.В. Рибкіна, В.Ф. Яковлева, Т.Г. Яковлевої, J. Eisenpapp та інш. присвячені встановленню раціональних умов, що забезпечують безпеку руху и раціональну роботу колії на існуючих залізницях.

Працездатний стан колії (згідно з ДСТ 27.002-89) оцінюється не тільки геометричними, але і характеристиками міцності, завдяки яким забезпечується безпечний пропуск поїздів із установленою швидкістю при дотриманні всіх геометричних вимог. Основою таких умов є функції накопичення ушкоджень колії по мірі росту і граничні (припустимі) їх значення. Незважаючи на те, що напруження у всіх елементах колії, які розраховуються за існуючою методикою, залежать від модуля пружності підрейкової основи, як головного параметра деформативності колії, розрахунок залізничної колії на міцність націлено на визначення її напружено-деформованого стану, але деформативні характеристики не мають статусу оцінних. В якості критеріїв міцності колії в інженерному методі розрахунку використані напруження, що допускаються, у різних елементах конструкції.

Аналіз робіт, присвячених експериментальному і теоретичному дослідженням в області розрахунків колії на міцність, показав, що дотепер відсутній належний розгляд питань, пов'язаних зі зміною напружено-деформованого стану колії від величини модуля пружності підрейкової основи. Недостатньо також вивчено особливості формування модуля пружності підрейкової основи колії. Крім того, відсутня методика розрахунку модуля пружності, яка б враховувала випадковий характер параметрів, що впливають на формування цієї величини. Існування такої методики важливе ще й тому, що модуль пружності підрейкової основи є єдиною ланкою між розрахунком верхньої будови колії на міцність й стабілізацією земляного полотна. Зазначена проблема не є новою, але залишається різнобічною і складною. Таким чином, необхідно проведення додаткових досліджень.

У *другому розділі* розроблено модель конструкції залізничної колії для дослідження деформативних процесів підрейкової основи з використанням методу кінцевих елементів,

виконано зіставлення результатів розрахунку за запропонованою моделлю й експериментальних даних, отриманих у натурних умовах.

Для складання розрахункових схем конструкції залізничної колії прийняті наступні передумови:

конструкція залізничної колії, що представляє собою збірку складових справних елементів (відповідають «Інструкції з утримання земляного полотна залізниць України», СНиП 2.02.01-83; ДСТ 7392-85, 7394-77, «Інструкції по улашту та утриманню колії залізниць України», ДСТ 78-89, 10629-88, 16277-93, 8161-75, 24182-80, 7174-75) має свої зазори і люфти, закладені конструктивними нормами. Наявність цих зазорів і їх величини носять імовірнісний характер. Однак врахування впливу даних величин вносять розкид у значення показників напружено-деформованого стану колії. Тому, щоб уникнути ускладнення розрахунку, всі елементи конструкції колії з'єднанні по контактуючим поверхням;

- нижня будова колії представлена у вигляді насипу висотою 3 м на підставі раніше проведених досліджень, де доведено, що на даній глибині відбувається загасання переміщень від зовнішніх сил;

- вертикальні сили в моделях прикладалися до обох рейок або шпал, в залежності від конструкції, що досліджується. Місце і площа прикладення сил відповідає контакту колісної пари вагона з рейкою при центральному положенні першої або місцю та площі контакту підкладок та шпал.

В обраному програмному забезпеченні автором підготовлена модель конструкції колії і визначені критерії необхідної точності завдання параметрів розглянутих ділянок колії. Так, наприклад, було встановлено, що для розгляду питань деформативності залізничної колії мінімальна довжина ділянки повинна бути 6 м.

За розробленою моделлю проведено розрахунки й одержано параметри напружено-деформованого стану об'єктів. Алгоритм розрахунку стану зводиться до такого:

$$P = f_{MKE}(\Omega, F, R, n | \Delta \leq 5\%),$$

$$\text{де } \Omega = \{\{\omega_1, \omega_2, \omega_i, \dots\}, \{s_1, s_2, s_i, \dots\}\}; \quad \omega_i = \{\{g_{i1}, g_{i2}, g_{ij}, \dots\}, \{\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \varphi_{ij}, \dots\}\}, \quad (1)$$

$$P = \{\{\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{ik}, \dots, \sigma_{ik}, \dots\}, \{y_{i1}, y_{i2}, y_{ik}, \dots, y_{ik}, \dots\}\},$$

де  $\Omega$  - збірка елементів колії;

$\omega_i$  - твердотільний  $i$ -й об'єкт множини елементів колії (рейка, шпала тощо);

$g_{ij}, \varphi_{ij}$  - відповідно  $j$ -й елемент множини геометричних розмірів і множини фізико-механічних властивостей об'єкту  $\omega_i$ ;

$S = \{s_1, s_2, s_i, \dots\}$  - множина зв'язків між об'єктами;

$F, R$  - відповідно множина навантажень і множина закріплень;

$n$  - кількість циклів розрахунку;

$\Delta$  - збіжність суміжних розрахунків;

$\sigma_{ik}, y_{ik}$  - відповідно  $k$ -й елемент напружень і деформацій об'єкту  $\omega_i$ .

$P$  - стан моделі відповідно до розрахунків за МКЕ.

НТБ  
ДНУЗТ

За отриманими результатами виконується аналіз і передача даних в інші системи обробки.

З підготовленими моделями (землполотно - щебеневий баласт товщиною 40 см – шпали типу АІ та землполотно - щебеневий баласт товщиною 40 см – шпали типу АІ –рейки типа Р65) виконано порівняльні зіставлення результатів розрахунку й експериментальних даних, отриманих у натурних умовах. На підставі отриманих результатів жорсткість і модуль пружності підшпальної основи складає відповідно за розрахунковими даними  $21,14...39,06 \text{ кг/см}^3$  і  $38,44...71,02 \text{ МПа}$ , а за експериментальними  $15,79...33,33 \text{ кг/см}^3$  і  $28,7...60,6 \text{ МПа}$ ; жорсткість і модуль пружності підрейкової основи складає відповідно за розрахунковими даними  $2,18...8,06 \text{ кг/см}^3$  і  $7,81...44,6 \text{ МПа}$ , а за експериментальними  $2,11...6,13 \text{ кг/см}^3$  і  $7,5...31 \text{ МПа}$ .

*Третій розділ* присвячено експериментальній оцінці достовірності розробленої моделі. На основі порівняння з результатами, які отримані при експериментальних дослідженнях, підтверджено достовірність розробленої моделі і можливість використання методу кінцевих елементів при розв'язанні задач по визначенню напружено-деформованого стану колії.

У даному розділі приведені результати впливу рухомого складу на колію із залізобетонними шпалами епюрою 1840 шт/км, пружинним скріпленням типу КПП-5, рейками UIC60, щебеневим баластом з товщиною шару під шпалою 40 см. При цьому метою досліджень було визначення експериментальним і теоретичним шляхом напружено-деформованого стану колії зазначеної конструкції при різних швидкостях руху рухомого складу і встановлення припустимих швидкостей руху. Результатом досліджень є рекомендації по встановленню швидкостей руху на ділянках колії з вищевказаною конструкцією, які наведені в п'ятому розділі.

Експериментальні дослідження проводили на ділянці Київ-Миронівка Південно-Західної залізниці. Для проведення дослідів був сформований дослідний поїзд із двох електровозів ЧС-8 і двох пасажирських вагонів. Поїздки здійснювали зі швидкостями 5, 100, 120, 130, 140, 155 км/год. У процесі виконання робіт на досліджуваній ділянці колії визначали наступні величини: напруження вигину в кромках підшви рейок; напруження вигину на зовнішніх гранях голівки рейок; напруження на шийці рейок (датчики прикріплювалися за методом Штумфа, але запис виконували по кожному окремо); горизонтальні і вертикальні переміщення голівки і підшви рейок; вертикальні переміщення шпали; горизонтальні сили, що діють на закладні елементи скріплення; характеристики пружності підрейкової основи.

Для розв'язання необхідних задач була складена модель конструкції колії і зроблені розрахунки напружень і деформацій за допомогою МКЕ. Порівняння результатів методики і експерименту дозволили зробити наступні висновки:.

1. Запропонована методика розрахунків враховує параметри ділянки, що відрізняється від «відмінного» стану і дозволяє одержувати результати близькі до експериментальних. Інтервал значень модуля пружності  $U$  підрейкової основи колії, розрахований за допомогою МКЕ, складає 30 ... 63 МПа, а отриманий експериментально - 31,2 ... 71,2 МПа.

2. Напруження в рейках і прогини рейок, розраховані з застосуванням МКЕ, близькі до максимальних значень. Різниця для напружень і прогинів знаходиться в межах для вагонів і локомотивів відповідно 5%, 6%, 14%, 8%.

3. Величини прогинів, отримані за допомогою МКЕ, мають наступні співвідношення. Їх значення щодо середніх експериментальних для локомотивів і вагонів вище на 5% і 13%, середніх імовірнісних експериментальних для локомотивів вище на 3%, а для вагонів нижче на 15%, максимально спостережених відповідно вище на 9% і 16%. Наведений аналіз свідчить про те, що результати, отримані за запропонованою моделлю, достатньо точно співвідносяться з експериментальними даними. Тому застосування МКЕ можна вважати обґрунтованим і використовувати його для розв'язання відповідних задач.

У четвертому розділі досліджено вплив модуля пружності на напружено-деформований стан колії. Визначено суттєвість впливу різних факторів на формування модуля пружності підрейкової основи. Обґрунтовано, що кожній конструкції колії відповідає діапазон значень модуля пружності  $U_{\min} - U_{\max}$ , викликаний розкидом параметрів і стану елементів. В дисертаційній роботі розглядався вплив типу й епюри шпал, типу скріплення, роду й товщини та стану баласту, роду та стану ґрунту на значення модулів пружності підрейкової основи.

Для визначення впливу різних факторів було застосовано метод кінцевих елементів, за моделлю, що описана в другому розділі даної дисертації.

В розрахунках були прийняті за основу, тобто набули статусу базових, такі конструкції:

1) рейки типу Р65, шпали типу ІА, баласт щебеневий з товщиною шару під шпалою 0,40 м, товщина піщаної подушки 0,2 м;

2) рейки типу Р65, шпали типу ШІ-1, скріплення КБ із товщиною прокладок 7 і 10 мм, баласт щебеневий з товщиною шару під шпалою 0,4 м, товщина піщаної подушки 0,2 м.

Усі розрахунки по дослідженню впливу того чи іншого фактора проведені для даних конструкцій чи відносно них. Для дослідження впливу перерахованих факторів на формування значень модуля пружності колії у вертикальній площині використовували такий алгоритм:

$$U = f(Y, F), \text{ де } Y = \{y_{11}, y_{12}, y_{1k}, \dots, y_{jk}, \dots\}, \quad (2)$$

$$Y \in P \mid F \neq \text{const}, \exists \omega \in \Omega, \omega \neq \text{const},$$

де  $Y$  - множина деформацій стану моделі  $P$

При дослідженні впливу роду ґрунту на значення модуля пружності підрейкової основи розглядали ґрунти з різними модулями деформації. Визначали зміни прогинів баласту, рейки, ґрунту, приведених мас рейко-шпальної решітки, баласту і земляного полотна, процентні співвідношення прогинів рейко-шпальної решітки, баласту і земляного полотна від модулів деформації ґрунтів при формуванні модуля пружності підрейкової основи колії.

Встановлено що: зі збільшенням модулів деформації ґрунту прогини елементів колії зменшуються за криволінійною залежністю, як для колії, яка спирається на залізобетонні, так і на дерев'яні шпали. Для обох конструкцій колії характерні три зони змін прогинів рейок, баласту і земполотна в залежності від модулів деформації ґрунту. Перша зона при модулях деформації ґрунту (для колії на дерев'яних шпалах до 15 МПа, на залізобетонних до 20 МПа), на якій відбувається стрімке зменшення прогинів зазначених елементів колії. Друга зона з модулями деформації ґрунту (відповідно 15...90 МПа і 20...80 МПа), який відповідає плавне зниження прогинів розглянутих елементів колії. Третя зона (відповідно більше 90 МПа, і більше 80 МПа), де прогини елементів колії змінюються по лінійній залежності. Частка прогинів земполотна в

сумарному прогині конструкції різна і залежить від характеристик шпал і модулів деформації ґрунтів. Але для колії на залізобетонних шпалах його частка в кілька разів (від 3 до 475 для рейко-шпальної решітки і від 3 до 19 для баласту) більше, ніж інших елементів. Для колії на дерев'яних шпалах його частка в 3...62 разів вище, ніж рейко-шпальної решітки, а частка баласту може бути як нижче в 3...21 разів, так і на кілька відсотків вище (до 17%), у залежності від роду ґрунту, що складає земполотно.

Приведені маси рейко-шпальної решітки для конструкції колії на залізобетонних шпалах у 2,3 рази більше, ніж на дерев'яних шпалах. Приведена маса ґрунту для конструкції колії на дерев'яних шпалах на 11...16% більше, ніж на залізобетонних шпалах. При модулі деформації ґрунту до 15 МПа, приведена маса баласту для конструкції колії на дерев'яних шпалах, менша ніж на колії, що спирається на залізобетонні шпали, а при модулі деформації ґрунту більш ніж 15 МПа - більша. Приведена маса колії для конструкції з залізобетонними шпалами на інтервалі до 25 МПа більше ніж з дерев'яними шпалами, а при модулях деформації ґрунту більш 25 МПа - менше. Для даних конструкцій колії при модулях деформації ґрунту до 40 МПа, що відповідає приблизно 40 МПа модуля пружності підрейкової основи колії, навантаження, рівна 25 т/вісь, сприймається за рахунок осадки ґрунтів земполотна. На інтервалі 40...50 МПа відбувається перерозподіл сприйняття навантаження. При модулях деформації ґрунту більш 50 МПа навантаження переробляється баластовим шаром. При зниженні навантаження на 3 т/вісь зменшуються приведені маси рейко-шпальної решітки на 5%, баласту на 4%, земполотна на 6%. При цьому інтервал перерозподілу сприйняття навантажень зрушується на 10 МПа, а перерозподіл сприйняття навантаження відбувається на інтервалі 50...60 МПа.

Зміна навантажень веде до пропорційної їм зміни прогинів елементів колії, але співвідношення прогинів елементів для конструкцій колії з однаковими фізичними елементами залишається незмінним.

На підставі даних, отриманих шляхом математичного моделювання, для базових конструкцій, які опираються на різні роди ґрунтів, були отримані діапазони значень модуля пружності підрейкової основи колії з кінцевими значеннями: мінімальним  $U_{\min}$  і максимальним  $U_{\max}$  (таблиця 1). Характеристики конструкцій колій описані вище.

Таблиця 1 Модулі пружності підрейкової основи у вертикальній площині для базових конструкцій

| Рід ґрунту                 | Значення модуля пружності, МПа |            |
|----------------------------|--------------------------------|------------|
|                            | $U_{\max}$                     | $U_{\min}$ |
| Пилувато-суглинисті        | 31.3/35.5                      | 13.8/19.7  |
| Супісок, легкий суглинок   | 40.7/49.1                      | 15.5/23.3  |
| Середній и тяжкий суглинок | 26.4/30.6                      | 7.5/14.3   |
| Глина легка                | 31.6/35.8                      | 7.4/9.6    |
| Глина середня й тяжка      | 57.7/69.6                      | 12.7/18.9  |

Примітка: чисельник – для колії на дерев'яних шпалах, знаменник – залізобетонних.

Вплив характеристик баластового шару проводили за двома напрямками: досліджували вплив роду і товщина баласту. У результаті досліджень встановлено, що:

розкид характеристик роду баластового шару спричинить за собою зміну прогинів рейок при щєбені на 3%, галечно-гравійно-піщаному баласті - 9%, гальковому чи гравійному - 3%, черепашковому - 27%; а зміна модулів пружності, у тій же послідовності відповідно на 4%, 12%, 3%, 14%. Заміна щєбеневого баластового шару галечно-гравійно-піщаним змінить прогини рейки на 15%, а модуль пружності на 12%; гальковим чи гравійної відповідно на 6% і 7%; черепашковим відповідно на 148% і 233%. Таким чином, підтверджено вплив роду баласту на формування значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині.

На основі розрахунків, проведених по дослідженню впливу товщини баласту на модуль пружності, можна зробити висновок, що зміна товщини баластового шару від 25 см до 40 см, істотно, (до 21%) впливає на модуль пружності. Крім того, зміна товщини баластового шару впливає на зміну напружень на контакті шпала з баластовим шаром (до 24%) і на основній площадці земполотна (до 18%) звідки випливає висновок про необхідність урахування даного фактора при визначенні значення модуля пружності підрейкової основи колії.

Врахування типу й ешорія шпал підтверджено експериментальними перевірками, тому питання зводиться до оцінки зазначених факторів на величину модуля пружності підрейкової основи колії.

За результатами досліджень можна зробити такі висновки.

Вплив типу шпал на значення модуля пружності колії зрозумілий: так, модуль пружності на шпалах типу ІА відрізняється від значень для колії на шпалах типу ІІА і ІІІА відповідно на 2...7% і на 7...10% у залежності від роду ґрунту. Навантаження, передає різними типами шпал на баласт, розподіляється, викликаючи зміну напружень на контакті шпал і баласту, до 62% а на площадці земполотна до 36%. Таким чином, підтверджено, що при визначенні значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині необхідно враховувати вплив типу шпал.

Вплив ешорія шпал на значення модуля пружності підрейкової основи незначний. Тому вплив даного фактора на значення модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині доцільно об'єднати з впливом типу шпал.

В існуючій методиці не враховували вплив жорсткості скріплення на величини модулів пружності підрейкової основи колії. Вплив зміни стану прокладок, різних поєднань прокладок на розкид значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині були враховані при визначенні модулів пружності в залежності від типу шпал і роду ґрунту.

Визначення впливу зазначених вище факторів на формування модуля пружності підрейкової основи проводили на підставі порівняння результатів, отриманих при розмаїтті поєднань елементів і їхнього стану в конструкції колії, з результатами, отриманими для базових конструкцій. За допомогою коефіцієнтів  $\tau_1$ , отриманих за результатами досліджень, оцінено вплив типу шпал, ешорія, типу скріплення на формування значень модуля пружності, за допомогою коефіцієнтів  $\tau_2$  (таблиця 2) - рід і товщину баласту  $h_0$ . Коефіцієнти, приведені в таблиці 2, дають можливість говорити про кількісний вплив того чи іншого фактора на значення модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині.

НТБ  
ДНУЗТ

Таблиця 2 - Значення коефіцієнтів  $\tau_1$  та  $\tau_2$  до базових модулів пружності підрейкової основи

| Характеристика підрейкової основи |                         | $\tau_1$ | Характеристика підрейкової основи |                    |                                       |       | $\tau_1$ |       |      |      |
|-----------------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------|----------|-------|------|------|
| Шпали                             | ІА, ІБ, 2000            | 1.02     | Шпали з/б                         | 1840, КБ           |                                       |       |          | 1     |      |      |
|                                   | ІА, ІБ, 1840            | 1        |                                   | 1840, КПІ, ПРП-2.3 |                                       |       |          | 1.3   |      |      |
|                                   | ІА, ІБ, 1600            | 0.98     |                                   | 1840, КПІ, ПРП-2.1 |                                       |       |          | 1.07  |      |      |
|                                   | ІІА, ІІБ, 2000          | 0.98     |                                   | 1600, КБ           |                                       |       |          | 0.98  |      |      |
|                                   | ІІА, ІІБ, 1840          | 0.97     |                                   | 1600, КПІ, ПРП-2.1 |                                       |       |          | 1.05  |      |      |
|                                   | ІІА, ІІБ, 1600          | 0.94     | Рід баласту                       |                    | $\tau_2$ при товщині баласту, $h_b$ . |       |          |       |      |      |
|                                   | ІІА, ІІБ, 2000          | 0.95     |                                   |                    | 25 см                                 | 30 см | 35 см    | 40 см |      |      |
|                                   | ІІА, ІІБ, 1840          | 0.94     |                                   |                    | Щебінь                                |       | 0.8      | 0.82  | 0.87 | 1    |
|                                   | ІІА, ІІБ, 1600          | 0.93     |                                   |                    | Гравійний                             |       | 0.6      | 0.61  | 0.65 | 0.74 |
|                                   | з/б, 1600, КПІ, ПРП-2.3 | 1.27     |                                   |                    | Гравійно-піщаний                      |       | 0.42     | 0.43  | 0.45 | 0.52 |

У *н'ятому розділі* висвітлено питання використання розробленої моделі в практичних задачах.

Методика визначення значень модуля пружності підрейкової основи залізничної колії у вертикальній площині.

Кожній конструкції колії відповідає діапазон значень модуля пружності  $U_{\min} - U_{\max}$ , викликаний розкидом значень параметрів і стану елементів колії. Модулі пружності для базових конструкцій при різних ґрунтах вважаємо основними (таблиця 1), а облік зміни конструкції колії запропоновано здійснювати за рахунок коефіцієнтів. За допомогою коефіцієнтів  $\tau_1$  враховуємо тип шпал, епору, тип скріплень,  $\tau_2$  (таблиця 2) - рід і товщину баласту  $h_b$ . Розрахункове значення модулів пружності підрейкової основи залізничної колії визначається за формулами:

$$U^I = U_{\min} \tau_1 \tau_2, \quad U^{II} = U_{\max} \tau_1 \tau_2 \quad (3)$$

При застосуванні запропонованої методики в існуючій методиці розрахунку колії на міцність визначення коефіцієнтів відносної жорсткості підрейкової основи і рейки проводять із застосуванням двох значень модуля пружності. В розрахунках максимального еквівалентного навантаження для визначення напружень у рейках від вигину, крутіння і прогинів та згинального моменту у рейках від дії еквівалентного навантаження застосовують  $U^I$ , а для максимального навантаження на шпалу -  $U^{II}$ . Визначення максимального еквівалентного навантаження для розрахунків прогинів рейок при обчисленні максимального динамічного навантаження від колеса на рейку проводять із застосуванням  $U^I$ , а ординати лінії впливу прогинів рейки в перетинах колії, розташованих під колісними навантаженнями від осей екіпажа -  $U^{II}$ . При визначенні максимального еквівалентного навантаження для розрахунків напружень і сил в елементах підрейкової основи застосовують тільки  $U^{II}$ . Максимальні напруження в елементах верхньої

будови колії визначаються за відомими залежностями. Запропонована методика була апробована в описаному у третьому розділі експерименті.

Для визначення середньоквадратичного відхилення динамічного навантаження колеса на рейку, обумовленої силами інерції надресорних частин унаслідок безперервних нерівностей на поверхні катання  $S_{ннк}$ , спочатку була запропонована розрахункова формула М.Ф. Веріго. Потім, з урахуванням запропонованого Г.М. Шахунянцем виразу для максимального значення динамічного коефіцієнта формула придбала існуючий на сьогоднішній момент вигляд. Розв'язуючи співвідношення, яке дозволяє використати спершу запропонованої формули, маємо, що жорсткість менш 33000 кГ/см відповідає колії для рейок Р75 – при  $U \leq 12,5$  МПа, Р65 – при  $U \leq 13,5$  МПа, Р60 – при  $U \leq 14,2$  МПа, Р50 – при  $U \leq 16,3$  МПа. Відповідно до запропонованих рекомендацій з використання у формулі коефіцієнта  $\alpha_0$  і з огляду на використання в розрахунках відкоригованих значень модулів пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, запропоноване визначення  $S_{ннк}$  проводити за наступними залежностями:

при  $U > 12$  МПа

$$S'_{ннк} = \frac{K_1 \alpha_0 U' V^2 \sqrt{q}}{d^2 \sqrt{k' U' - 0,32 k' ^2 q}},$$

при  $U \leq 12$  МПа

$$S'_{ннк} = \frac{K_0 \alpha_0 U' V^2 q}{d^2 k'}, \quad (4)$$

де коефіцієнти, що характеризують ступінь нерівномірності утворення прокату поверхні кочення коліс вагонів, електровозів і тепловозів  $K_1 = 1,63 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_0 = 1,125 \cdot 10^{-6}$ ;

$q$  – невідресорена вага, що приходить на одне колесо, кН;

$d$  – діаметр колеса, м,  $k$  – м<sup>-1</sup>.

На сьогодні умови експлуатації залізниць змінилися, тому існує необхідність у перерахунку коефіцієнтів  $\alpha_0$  (враховуючого відношення надресорної маси колеса до суми надресорної маси колеса і приведеної до контакту колеса і рейки маси колії) і  $\alpha_1$  (враховуючого співвідношення коефіцієнтів  $\alpha_0$  для колії з залізобетонними і дерев'яними шпалами) як відповідно до змін, зв'язаних із уведенням запропонованої методики, так і з урахуванням основних конструкцій верхньої будови колії. Для вище зазначених конструкцій колії було проведено розрахунки за допомогою методу кінцевих елементів і за викладеною М.Ф. Веріго і С.С. Крелкогорським методикою розрахунку були визначені значення зазначених коефіцієнтів. Результати розрахунків приведені в таблиці 3. Крім наведених значень за розробленим алгоритмом можна отримати значення коефіцієнтів  $\alpha_0$  і  $\alpha_1$  для всіх одиниць рухомого складу.

Таблиця 3 - Значення коефіцієнтів  $\alpha_0$  та  $\alpha_1$  у залежності від роду ґрунту для ЧС-8

| Рід ґрунту                | $\alpha_0$  | $\alpha_1$ | Рід ґрунту    | $\alpha_0$ | $\alpha_1$ |
|---------------------------|-------------|------------|---------------|------------|------------|
| Пилувато-суглинисті       | 0.278/0.276 | 0.99       | Глина легка   | 0.243/0.23 | 0.94       |
| Супісок, легкий суглинок  | 0.3/0.275   | 0.92       | Глина середня | 0.39/0.319 | 0.79       |
| Суглинок середній, тяжкий | 0.253/0.224 | 0.89       | Глина тяжка   | 0.377/0.37 | 0.97       |

Примітка: чисельник – для колії на дерев'яних шпалах, знаменник – залізобетонних.

У процесі експлуатації з'являються ділянки колії, конструкція яких відрізняється від типової. Маються на увазі такі ділянки, де з'являється так званий підбаластний шар, тобто шар забрудненого ущільненого баласту, верхня поверхня якого повторює верхню поверхню площадки

земполотна. Товщина даного шару коливається в межах 50 см. При наявності щебеневого підбаластного шару змінюється загальний модуль пружності підрейкової основи. Якщо зазначений шар вже існує, як наслідок проведених ремонтів, то користуючись коефіцієнтами, наведеними для слабкого баласту у п'ятому розділі, можна розрахувати модуль пружності підрейкової основи колії. При товщині шару більш 30 см, конструкцію колії можна вважати мало деформованою.

Деформативність колії - виникнення пружних деформацій у навантаженій конструкції колії, викликаних як пружними змінами форми або розмірів елементів конструкції колії чи їхніх частин, так і обумовлені цими змінами переміщення окремих точок конструкції колії.

Головним параметром деформативності колії є модуль пружності підрейкової основи колії. При розгляді причинно-наслідкового зв'язку для оцінки технічного ефекту нормування жорсткості колії одержуємо наступну картину. Чим менше значення модуля пружності, тим більше прогин, а чим більше прогин, тим більше амплітудно-частотні коливання, які швидше розладнює колію. Крім того, на відповідній стадії виникає наступна залежність: чим більше модуль пружності підрейкової основи колії, тим жорсткіше колія, тим більша інтенсивність відмов елементів колії, гірше комфортність їзди, менш рентабельні вкладення на посилюючий шар. Таким чином, виникає необхідність у нормуванні значень модуля пружності.

Як підкреслювалося при аналізі впливу модулів деформації ґрунту на значення модулів пружності підрейкової основи колії (у четвертому розділі), в зоні значень модуля деформації ґрунту до 20 МПа зміна значень прогинів елементів колії стрімка. Даний діапазон не випадковий, так у будівництві ґрунти основи вважаються однорідними, тобто мало мінливі у відношенні стисливості, якщо  $E_p \geq 20$  МПа. При такому відношенні модулів деформації ґрунтів осідання в окремих точках мало розрізняються за величиною, а можливість видавлювання ґрунтів зведена до мінімуму, що запобігає утворенню хвороб земляного полотна. Використовуючи будівельні норми, можна встановити обмеження за величиною модуля пружності земполотна, а саме, щоб ґрунти, що складають його, повинні мати значення модуля деформації не нижче 20 МПа. При прийнятті цієї умови, з урахуванням залежності між силами, що діють на рейку, і її деформаціями, можна стверджувати, що кожній конструкції колії буде відповідати своє мінімально-допустиме значення модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині  $U_{\text{min,dop}}$ . Таким чином, кожній конструкції колії при впливі навантаження на рейку  $P$  будуть відповідати свої максимально-допустимі значення прогинів рейок  $u_{\text{max,dop}}$ . Прогини рейок залежать як від деформацій елементів конструкції, так і від наявності люфтів між ними. Максимальний сумарний прогин люфтів  $u_{\text{max,люфт}}$  установлюваний для кожної конструкції колії з урахуванням геометричних норм і допусків складових її елементів, може служити інтегральною оцінкою утримання верхньої будови колії. А сумарний прогин без люфтів  $u$  може бути інтегральною оцінкою стану земполотна. Таким чином, можна контролювати деформативність колії. Для прийнятих за базові конструкцій колії мінімально-допустимі значення модулів пружності у вертикальній площині при  $E_p = 20$  МПа, за розрахунками за допомогою МКЕ: для дерев'яних шпал  $U_{\text{min,dop}} = 21,3$  МПа, а для залізобетонних шпал  $U_{\text{min,dop}} = 22,4$  МПа.

Граничні значення модулів пружності  $U'_{\min \text{ доп}}$ ,  $U''_{\max \text{ доп}}$  для інших конструкцій, використовуючи запропоновану методику по визначенню модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, можна знайти підставляючи у (3) замість  $U_{\min}$  -  $U'_{\min \text{ доп}}$ , а замість  $U_{\max}$  -  $U''_{\max \text{ доп}}$ . Значення максимальних прогинів розраховується як

$$y_{\max \text{ доп}} = \frac{P}{\sqrt[3]{64EIU'_{\min \text{ доп}}}} \quad (5)$$

Оцінювати деформативність колії можна таким способом.

1. На дослідній ділянці колії виміряти статичний прогин від навантаження  $u_{\text{изм}}$  (при навантаженнях 60...160 кН), прогин від наявності лофтів  $u_{\text{л}}$  (при навантаженнях до 40...50 кН). Визначити чистий прогин  $u = u_{\text{изм}} - u_{\text{л}}$ .

2. Розрахувати мінімально-допустимі значення модулів пружності підрейкової основи колії  $U'_{\min \text{ доп}}$  і максимально-допустимі значення прогинів  $u_{\max \text{ доп}}$  і  $u_{\max \text{ лофт}}$  для даної конструкції.

3. Порівняти допустимі й обмірjовані величини:

а) за умови:  $u_{\max \text{ доп}} \geq u$ ,  $U'_{\min \text{ доп}} \leq U$  (умови деформативності земполотна),  $u_{\max \text{ лофт}} \geq u_{\text{л}}$  (умова деформативності верхньої будови колії) вважати, що колія відповідає вимогам деформативності;

б) за умови:  $u_{\max \text{ доп}} < u$ ,  $U'_{\min \text{ доп}} > U$ ,  $u_{\max \text{ лофт}} < u_{\text{л}}$  вважати, що колія не відповідає вимогам деформативності і приймати рішення по підвищенню її жорсткості: або посиленню земполотна, або жорсткості режиму утримання верхньої будови колії.

У процесі теоретичних досліджень на підставі впливу модуля деформації ґрунтів можна запропонувати для базових конструкцій на дерев'яних та залізобетонних шпалах показники деформативності колії, що наведені в таблиці 4. Для інших конструкцій, обмежуючи значення модулів пружності  $U'_{\min \text{ доп}}$  та  $U''_{\max \text{ доп}}$ , розраховують за (3). Однак остаточне рішення для прийняття меж за критерієм деформативності потрібні прийматися після експериментальних випробувань, які б враховували не тільки вплив ґрунту, а й інших елементів конструкції колії, комфортність їзди та кількість відмов елементів колії.

Таблиця 4 – Якісна оцінка деформативності колії для базових конструкцій

| Оцінка       | Для базової конструкції на дерев'яних шпалах |                               | Для базової конструкції на залізобетонних шпалах |                               |
|--------------|----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
|              | Модуль пружності підрейкової основи, МПа     | Модуль деформації ґрунту, МПа | Модуль пружності підрейкової основи, МПа         | Модуль деформації ґрунту, МПа |
| Відмінно     | $38 \leq U < 78$                             | $30 \leq E_{\text{гр}} < 60$  | $46 \leq U < 71$                                 | $50 \leq E_{\text{гр}} < 120$ |
| Добре        | $21 \leq U < 38$                             | $20 \leq E_{\text{гр}} < 30$  | $22 \leq U < 46$                                 | $20 \leq E_{\text{гр}} < 50$  |
| Задовільно   | $11 \leq U < 21$                             | $10 \leq E_{\text{гр}} < 20$  | $12 \leq U < 22$                                 | $10 \leq E_{\text{гр}} < 20$  |
|              | $U''_{\max \text{ доп}} \geq 78$             | $E_{\text{гр}} \geq 60$       | $U''_{\max \text{ доп}} \geq 71$                 | $E_{\text{гр}} \geq 120$      |
| Незадовільно | $U'_{\min \text{ доп}} < 11$                 | $E_{\text{гр}} < 10$          | $U'_{\min \text{ доп}} < 12$                     | $E_{\text{гр}} < 10$          |

Методика розрахунку характеристик стабілізуючого шару. Під зазначеним терміном «стабілізуючий шар» розуміється шар, що укладається між елементами конструкції колії, чи шар,

що є складовою частиною одного з них, товщина якого повинна вибиратися в залежності від конкретних характеристик і призначення колії таким чином, щоб забезпечувалися вимоги міцності і деформативності колії.

Основні вимоги, пропоновані до стабілізуючого шару: добре розподіляти навантаження, стабілізувати вібрації, мати високу несучу здатність, відводити воду і бути стійким до промерзання.

Конструкція стабілізуючого шару визначається геометричними, фізико-механічними і техніко-економічними розрахунками. Він може складатися з одного чи декількох шарів. Крутість укосів відповідає крутості встановлений для даного матеріалу відповідно до нормативних документів (СНІП II-39-76, ТУМ 34, 31, 25 та інш.).

Головним параметром стабілізуючого шару при оцінці і нормуванні деформативності колії повинен виступати модуль деформації шару  $E_{\text{шару}}$ . Густина шару визначається розрахунком по стабілізації земполотна. Можливість використання шару визначається розрахунками на міцність та техніко-економічними розрахунками. У залежності від призначення колії вимоги за умовами забезпечення її деформативності, а, отже, і до модуля деформації стабілізуючого шару різні. З огляду на запропоновану раніше методику визначення значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, пропонується у формули визначення зазначеної величини (3) ввести коефіцієнт  $\tau_3$ , що враховує зміну модуля пружності підрейкової основи колії при наявності стабілізуючого шару:

$$U' = U_{\min} \tau_1 \tau_2 \tau_3; \quad U'' = U_{\max} \tau_1 \tau_2 \tau_3 \quad (6)$$

Якщо стабілізуючий шар формується з одного матеріалу ( $E=\text{const}$ ), то значення коефіцієнта  $\tau_3$  беруться відповідно до пропонованих значень  $\tau'_i$  у залежності від його матеріалу ( $E$ ) і товщини ( $h_{\text{шару}}$ ) та модуля деформації земполотна ( $E_{\text{гп}}$ ), на яке опирається шар (рисунк 1). Якщо стабілізуючий шар складається з декількох шарів, то коефіцієнт  $\tau_3$  дорівнює

$$\tau_3 = \prod_{i=1}^n \tau'_i, \quad (7)$$

де  $\tau'_i$  - коефіцієнти, що враховують зміну модуля пружності підрейкової основи колії наявністю кожного шару та показують ефективність його використання;

$n$  - кількість шарів, що складають стабілізуючий шар.

Крім того, дана методика застосовна і при зворотній задачі, тобто, при виборі конструкції стабілізуючого шару для зміни жорсткості колії. Коефіцієнт  $\tau_3$  розраховують за такими залежностями:

$$\begin{aligned} \text{при необхідності посилення жорсткості конструкції колії } \tau_3 &= \frac{U'}{U'_{\min \text{ доп}}} = \frac{U'_{\min \text{ доп}}}{U'} , \\ \text{при необхідності зняження жорсткості конструкції колії } \tau_3 &= \frac{U''}{U''_{\max \text{ доп}}} = \frac{U''_{\max \text{ доп}}}{U'} , \end{aligned} \quad (8)$$

де  $U'_{\min\text{доп}}$ ,  $U'_{\max\text{доп}}$ ,  $U$  – відповідно мінімально і максимально допустимі за класифікацією деформативності колії та фактичне значення модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині.

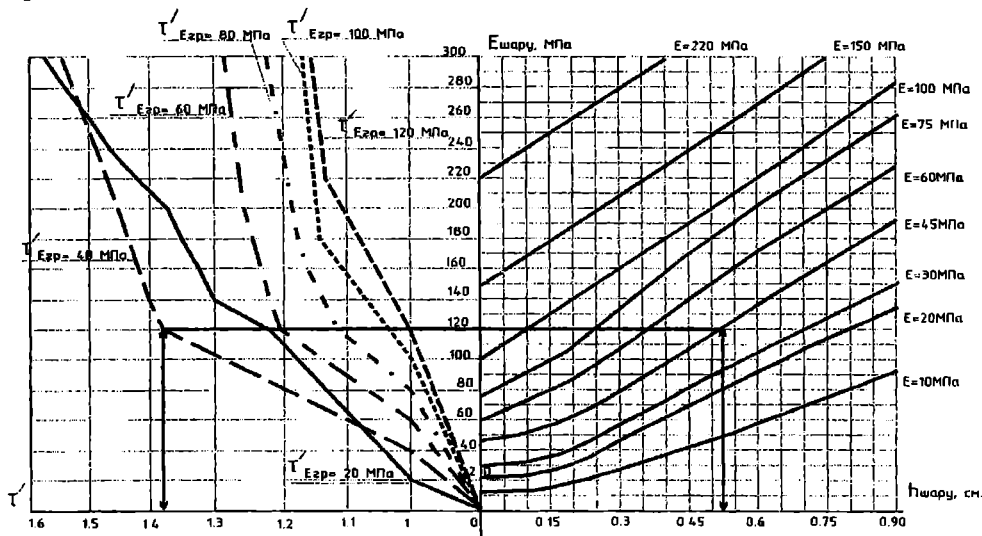


Рисунок 1 – Графік залежності ефективності використання різноманітних матеріалів стабілізуючих шарів від модуля деформації земляного полотна.

Зазначена методика уніфікує багатоваріантність при виборі конструкції стабілізуючого шару.

Оцінка напружено-деформованого стану колії з рейками типу UIC60 і скріпленням КПП.

У результаті виконаних експериментальних досліджень було встановлено розрахункові параметри рейок UIC60, умови обертання рухомого складу по колії на залізобетонних шпалах з рейками типу UIC60 і скріпленнями КПП.

За результатами експериментальних і теоретичних розрахунків за умовами безпеки руху, міцності і стійкості для колії з залізобетонними шпалами, рейками типу UIC60 і скріпленнями КПП максимально припустима швидкість сучасного існуючого на залізницях України рухомого складу рекомендована 140 км/год.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача підвищення ефективності експлуатації колії при дотриманні нормативних значень показників поза устроєм і утриманням залізничної колії. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у такому.

1. Розроблена модель конструкції залізничної колії при зовнішній дії для дослідження деформативних процесів підрейкової основи з використанням методу кінцевих елементів, яка дозволяє прогнозувати поведінку конструкції колії залежно від її геометричних, фізико-

механічних характеристик, а також від значення і місця прикладання сил. Розрахунками за розробленою моделлю, з підтвердженими експериментальними дослідженнями, встановлено, що конструкція колії, яка знаходиться в справному стані, тобто відповідає вимогам правил технічної експлуатації і нормам утримання, в середньому має розкид між мінімальними та максимальними значеннями модуля пружності підрейкової основи для конструкцій із залізобетонними шпалами у 3,4 рази, для конструкцій із дерев'яними шпалами - 2,68 рази, напружень - відповідно у 1,2 та 1,15 рази.

2. Виковано комплексну оцінку впливу параметрів підрейкової основи на деформативність колії. Отримано, проаналізовано і оцінено аналітичні залежності між різними факторами і модулем пружності підрейкової основи колії при розв'язанні задач визначення міцності, надійності і стійкості залізничної колії.

3. На основі комплексних експериментально-теоретичних досліджень розроблена нова методика визначення значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, яка враховує випадковий характер параметрів, що впливають на формування модуля пружності і дозволяє визначати дану величину у вигляді інтервалу значень.

4. Запропоновано рекомендації по використанню розробленої методики визначення значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, застосовування яких дозволить більш точно (від 1,23 до 1,62 рази) визначити сили взаємодії колії і рухомого складу, а також напружено-деформований стан елементів колії (від 3,4 до 4,23 рази) у тому числі при наявності відхилень від «відмінного» стану.

5. На підставі розробленої методики по визначенню значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині, внесено пропозицію по оцінці деформативної працездатності залізничної колії. Введення додаткового техніко-економічного критерію дозволить: комплексно і диференційовано враховувати показники надійності колії при вирішенні питань про збільшення швидкості руху і осьового навантаження поїздів; підвищити вплив і ефективність застосовування баластного шару (до 4,2 разів), скріплення (до 6 разів) і шпал (до 3 разів), що у ряді випадків дозволить довше експлуатувати колію без проведення ремонтних робіт, тобто подовжити її працездатний стан.

6. Для розгляду питань забезпечення вимог міцності, стійкості і деформативності введено поняття стабілізуючого шару, який укладається між елементами конструкції колії або є складовою частиною одного з них. Залежно від вимог за деформативністю колії розроблено рекомендації по розрахунках параметрів стабілізуючого шару та встановлено залежності ефективності використання матеріалів для укладання у шар від модуля деформації земполотна, що уніфікує багатоваріантність при виборі способів зміцнення конструкції колії.

7. Визначено параметри ефективного застосовування підбаластного щебеневого шару. Встановлено, що ділянки залізничної колії, які мають підбаластний щебеневий шар, утворений в процесі експлуатації, більше 30 см, відносяться до мало деформованих ділянок. А для посилення конструкцій колій, які обпираються на земляне полотно, що складається з ґрунтів середньої і слабкої міцності, товщина підбаластного щебеневого шару більше 30 см не доцільна.

НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА

НАЦІОНАЛЬНОГО  
ІНСТИТУТУ  
ТЕХНІЧНОЇ НАУКИ  
І АКАДЕМІКА

НІВ  
ДНУЗТ

8. Результати дисертаційної роботи використано в науково-дослідних роботах, виконаних за замовленням Укрзалізниці. Отримані діапазони значень модуля пружності підрейкової основи колії у вертикальній площині використані при підготовці даних при виконанні науково-дослідної роботи по коректуванню правил розрахунку колії на міцність. В рамках роботи по встановленню допустимих швидкостей руху на ділянках колії із залізобетонними шпалами, пружинним скріпленням типу КПП і рейками УІС60 визначено розрахункові параметри рейок УІС60.

***Основні положення та результати дисертацій опубліковано у таких роботах.***

1. Деформация подшпального упруго-вязкого инерционного основания под динамической нагрузкой / Данович В.Д., Патласов А.М., Халипова Н.В., Бондаренко И.А. // Збірник наукових праць ДПТ. - Вип. 4. - Дніпропетровськ: Транспорт, 1999. - С. 5-22.
2. Выбор расчетной схемы и параметров железнодорожного пути при расчете методом конечных элементов / Данович В.Д., Рыбкин В.В., Патласов А.М., Бондаренко И.А. // Стронтельство: Сб. научн. Тр. ДИИТа. – Вип. 10. – Днепропетровск, 2002. – С. 35-45.
3. Влияние параметров грунта на значения вертикального модуля упругости пути / Данович В.Д., Рыбкин В.В., Патласов А.М., Бондаренко И.А. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 2. – Днепропетровск, 2003. – С. 151-154.
4. Рыбкин В.В., Бондаренко И.А. О корректировке правил расчетов железнодорожного пути на прочность // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт, № 2 (9). – Гомель, 2004. – С. 42-44.
5. Бондаренко И.А. К вопросу определения модуля упругости пути в вертикальной плоскости. // Транспортні системи і технології, вип. 5, – К.: КУЕТТ, 2004. – С. 16-27.
6. Інженерний розрахунок залізничної колії на міцність / Рыбкин В.В., Баль О.М., Бондаренко І.О., Сисін М.П. // науково-практичний журнал «Транспорт України» № 2. – Київ, 2005. – С. 40-44.

***Додаткові праці.***

7. Патласов А.М., Бондаренко И.А. К вопросу определения напряженного состояния рельсов методом конечных элементов // Труды X Межд. научн.-практ. конфер. «Проблемы механики железнодорожного транспорта». - Днепропетровск, март 2000. – С. 98.
8. Данович В.Д., Патласов А.М., Бондаренко И.А. Использование метода конечных элементов и современного программного обеспечения для расчета железнодорожных рельсов и крестовин // Труды IV Межд. научн.-практ. конфер. «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» - Москва, 2001. – С. V-19.
9. Данович В.Д., Бондаренко И.А. К вопросу о выборе модуля упругости пути // Труды міжн. наук.-практ. конфер. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління». - Київ, листопад 2003. –С. 48.

НТБ  
ДНУЗТ

10. Оцінка параметрів пружної клеми марки КП-5.2 (Костюк М.Д., Рыбкін В.В., Бондаренко І.О., Іванченко Н.М.) - Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 2. – Дніпропетровськ, 2003. – С. 11-17.

11. Бондаренко І.О. О необходимости уточнения расчетных характеристик железнодорожного пути // Труды XI Межд. научн.-практ. конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта» - Днепропетровск, май 2004. - С. 45.

12. Предложения по корректировке правил расчета железнодорожного пути на прочность / Рыбкин В.В., Баль О.М., Бондаренко И.А., Сысин Н.П. // Труды межд. научн.-практ. конф. “Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и инженерных сооружений. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований”. - Москва, октябрь 2004. – С. IV-48.

13. Рыбкин В.В., Бондаренко И.А. Предложения по оценке деформативности железнодорожного пути. // Труды 65 Межд. научн.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». - Дніпропетровськ, травень 2005. – С. 182.

## АНОТАЦІЯ

Бондаренко І.О. Підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2006.

На основі моделі конструкції залізничної колії при зовнішній дії рухомого складу для дослідження деформативних процесів підрейкової основи, проведених експериментів і теоретичних досліджень, виконана комплексна оцінка впливу різних факторів на величину модуля пружності колії у вертикальній площині, розроблена методика визначення зазначеної величини для інженерних розрахунків колії. Запропонована комплексна методика дозволяє: поєднати розрахунки колії на міцність й стабілізацію земполотна; оцінювати деформативність колії, вирішувати питання про зміну експлуатаційних умов комплексно і диференційовано; підвищити вплив і ефективність застосовування елементів колії; визначати заходи щодо стабілізації деформативності колії. В роботі визначено розрахункові параметри рейок UIC60.

Отримані теоретичні й практичні результати використано при виконанні науково-дослідних робіт за завданням Головного управління колійного господарства Укрзалізниці.

**Ключові слова:** деформативність, модуль пружності підрейкової основи колії, напружено-деформований стан колії, конструкція колії, підрейкова основа, параметри колії, модель, метод кінцевих елементів.

НТБ  
ДНУЗТ

## АННОТАЦИЯ

Бондаренко И.А. Повышение качества оценки работоспособности железнодорожного пути за счет усовершенствования расчетных параметров подрельсового основания. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2006.

Исследования выполнены с использованием системного подхода, учитывающего разнообразие существующих конструкций железнодорожного пути в пределах Украины. Научно обоснована разработка новой расчетной методики по определению интервала значений модуля упругости пути в вертикальной плоскости для различных конструкций пути. Для решения этой задачи предложены факторы, влияющие на формирование модуля упругости пути и модель для исследования деформативных процессов подрельсового основания.

На основе разработанной модели конструкции железнодорожного пути при внешнем воздействии для исследования деформативных процессов подрельсового основания с использованием метода конечных элементов, проведенных экспериментов и теоретических исследований: дана комплексная оценка влияния параметров подрельсового основания на деформативность пути; получены зависимости между различными факторами и модулем упругости подрельсового основания пути; разработана новая методика определения значений модуля упругости подрельсового основания пути в вертикальной плоскости, учитывающая случайный характер параметров, влияющих на формирование модуля упругости, позволяющая определять интервал значений данной величины и объединяющая расчеты пути на прочность и по стабилизации земляного полотна.

Методика по определению расчетных значений модуля упругости подрельсового основания пути в вертикальной плоскости позволила: предложить рекомендации, использование которых, дает возможность более точно определять силы взаимодействия пути и подвижного состава, а также прочность пути и наметить мероприятия по усилению конструкции пути и повышению безопасности движения; внести предложение по оценке деформативной работоспособности железнодорожного пути. Ввод дополнительного технико-экономического критерия позволит: во-первых, при решении вопроса об увеличении скорости движения и осевой нагрузки поездов учитывать и показатели надежности пути, то есть, решать данный вопрос комплексно и дифференцированно; во-вторых, повышает влияние и эффективность использования балластного слоя, скреплений и шпал, что в ряде случаев позволит дальше и эффективней эксплуатировать путь без проведения ремонтных работ, то есть, продлить его работоспособное состояние.

Для рассмотрения вопросов по обеспечению условий прочности, устойчивости и деформативности введено понятие стабилизирующего слоя, который укладывается между элементами конструкции пути или является составной частью одного из них. В зависимости от требований по деформативности пути разработаны рекомендации по расчету параметров

стабилизирующего слоя, что унифицирует многовариантность при выборе способов усиления конструкции пути.

Определены расчетные параметры рельсов UIC60.

Полученные в работе новые научные положения составляют базу для решения одной из важнейших задач железнодорожного транспорта — повышения работоспособности железнодорожного пути. Теоретические и практические результаты использованы при выполнении научно-исследовательских работ по заданию Главного управления путевого хозяйства Укрзалізничі.

**Ключевые слова:** деформативность, модуль упругости подрельсового основания пути, напряженно-деформированное состояние пути, конструкция пути, подрельсовое основание, параметры пути, модель, метод конечных элементов.

## SUMMARY

Bondarenko I. A. Upgrading estimation of capacity of railway due to the improvement of computation descriptions of subrail foundation. — Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.06 - "Railway Track". - Dnipropetrovsk national university of railway transport named after Academician V. Lazaryan ; Dnipropetrovsk, Ukraine, 2006.

On the basis of model of construction of railway at the external action of rolling stock for research of deformative processes of subrail basis, conducted experiments and theoretical researches, executed complex estimation of influencing of different factors on the size of the module of resiliency of track in the vertical plane, developed method of determination of the marked size for the engineering computations of track. The offered complex method settles to put together computations of path on durability and on stabilization of earthen linen; to estimate deformativity paths, at the decision of question about the increase of rate of movement and carrying capacity of trains, allows to take into account reliability indexes of path, to decide a question about the change of operating terms complex and it is differentiated; to promote influencing and efficiency of application of elements of track, to determine the measures on stabilization of deformativity track UIC60.

The got theoretical and practical results are used for implementation of research works on the task of headquarters of travel economy of Ukrainian Railway Department (Ukrzaliznytsja).

**Keywords:** deformativity, module of resiliency of subrail track, tensely-deformed state of track, construction of track, subrail foundation, parameters of track, model, method finite element.

НТБ  
ДНУЗТ

БОНДАРЕНКО ПРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІ ЗА  
РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

 д.т.н., професор Рибкін В.В.

Підписано до друку «24» 04 2006 р.

Формат паперу 60х48 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.

Друк офсетний. Умовн.-друк. арк. 0,9. Обл.-видав. арк. 1,0.

Замовлення №562. Тираж 100. Безкоштовно.

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

Свідчення ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:  
49010, вул. акад. В.А. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 10

Сканіровала Камянська Н.О.

НТБ  
ДНУЗТ