СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ДАРЕНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК. 625.143.482

НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСІВ РОБОТИ ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ СИСТЕМИ “ЕКІПАЖ – РЕЙКОВА КОЛІЯ”

Спеціальність 05.22.12 – промисловий транспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Луганськ – 2012

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Український державній академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант -

доктор технічних наук, професор
Чихладзе Елгуджа Давидович
Українська державна академія залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України
завідувач кафедри "Будівельна механіка і гідравліка"

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, лауреат державної
премії України в галузі науки і техніки
Даниленко Едуард Іванович,
Державний економіко-технологічний університет Міністерства
освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри
"Реконструкції та експлуатації залізничних споруд" (м. Київ)

доктор технічних наук, професор
Нечаєв Григорій Іванович,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України,
завідувач кафедри "Транспортні технології" (м. Луганськ)

доктор технічних наук, професор
Парунакян Вааган Емілійович
Приазовський державний технічний університет
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України,
завідувач кафедри "Промисловий транспорт" (м. Маріуполь)

Захист відбудеться "07" листопада 2012 р. в 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 29.051.03 у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, квартал Молодіжний, 20а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Автореферат розісланий "06" жовтня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

докт. техн. наук, професор Ю.І. Осенін

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Промислові залізниці є важливою ланкою виробничих процесів підприємств, складовою частиною транспортної системи України. Більше половини вантажів, що перевозяться по магістральних залізницях, навантажується на коліях промислових підприємств.

Промислові залізниці мають ряд істотних особливостей, перш за все, високі осьові навантаження (до 500-600 кН), значну (до 60 %) частину колії в кривих малих радіусів, круті ухили профілю, високу ступінь забруднення баласту при значно менших, порівняно з магістральним транспортом, швидкостях руху поїздів. У зв'язку з цим силовий вплив спеціального та спеціалізованого рухомого складу промислового транспорту на колію значно відрізняється від силового впливу в умовах магістрального транспорту. У результаті такого впливу колія промислових залізниць в деяких умовах працює на межі технічних можливостей, відбувається її інтенсивний розлад і вихід з ладу, зменшення загальних ресурсів роботи. Це призводить до сходжень рухомого складу, що викликає важкі наслідки при перевезеннях особливо небезпечних вантажів - розплавленого металу і шлаку, створює загрозу для життя і здоров'я працівників підприємств, що знаходяться в безпосередньому контакті з технологічним промисловим транспортом.

Між тим, прийняті в інженерній практиці методи і способи визначення дії рухомого складу промислового транспорту на колію, способи розрахунків елементів колії на міцність базуються на теоріях, розроблених для умов залізниць загального користування - відносно невеликих, практично однорідних осьових навантажень і більш високих швидкостей руху. Положення і допущення цих теорій, їх розрахункові схеми не завжди відповідають умовам експлуатації промислових залізниць, в ряді випадків дають занижені результати.

Таким чином, актуальною є проблема підвищення ресурсів роботи промислового транспорту шляхом підвищення достовірності визначення сил дії на колію рухомого складу та її напружено-деформованого стану. Актуальність роботи підтверджується тим, що в теперішній час відбувається значна кількість сходів рухомого складу в умовах промислових залізниць, яка викликана саме технічним станом колії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація узагальнює результати досліджень автора в області розрахунків взаємодії колії і рухомого складу і розрахунків напружено - деформованого стану елементів верхньої будови колії в умовах промислових залізниць. Дослідження виконувалися в 1984 - 1991 роках в рамках науково - дослідницьких робіт за замовленням Головного транспортного управління Міністерства чорної металургії СРСР: "Розробка системи повторного використовування залізобетонних шпал на підприємствах Мінчермета СРСР", 1984 - 1985 роках № госрегистрации ГР01830039004, відповідальний виконавець; "Розробка і упровадження технологічної документації на повторне використовування матеріалів верхньої будови колії на підприємствах Мінчермета СРСР", 1985 - 1988г. № госрегистрации ГР01870019011, керівник теми; "Розробка і упровадження технологічної документації на повторне використовування матеріалів верхньої будови колії на підприємствах Мінчермета СРСР", 1985 - 1988 р. № госрегистрации ГР01870019011, керівник теми; "Розробка і впровадження способів зварки рейок на ухилах більше 30 $^{0}/_{00}$" 1988 - 1991 р. № госрегистрации ГР 0187007056, керівник теми.

В 1998 - 2010 роках дослідження виконувалися відповідно до плану науково - дослідницьких робіт УкрДАЗТ, розробленого відповідно до Державної програми розвитку і модернізації залізничного транспорту України на 1998 - 2010 роки і Програми розвитку фундаментальних досліджень і їх використовування, прийнятого Кабінетом Міністрів на підставі Закону України "Про основи державної політики у сфері науки і науково - технічної діяльності", в рамках тематичного плану Міністерства транспорту і зв'язку України, тема: «Розробка теорії та методів оптимізації несучих конструкцій транспортних споруд» (номер державної реєстрації 6110U002127) і «Розробка теоретичних основ та експериментальні дослідження впливу струмів на бетон та розчин бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій» (номер державної реєстрації 0110U002128) - 2010 рік.

В 2008-2010 роках робота виконувалася за замовленням ЗАТ «Донецьксталь» по темі «Розробка єдиного технологічного процесу роботи під'їзної колії ЗАТ «Донецьксталь» - металургійний завод» та станції Донецьк ДП Донецька залізниця (номер державної реєстрації 0108U003761).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є рішення науково-прикладної проблеми підвищення ресурсів роботи промислового транспорту на основі прогнозування стану системи «екіпаж – рейкова колія» шляхом вдосконалення методів визначення сил впливу на колію рухомого складу і розвитку методів дослідження напружено-деформованого стану колії за рахунок використання концепції дискретної рейкової основи з нелінійними пружно-дисипативними характеристиками. Це дозволяє врахувати просторові динамічні сили, які виникають при русі вагонів по нерівнопружній колії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробка концепції визначення динамічних просторових сил взаємодії спеціального і спеціалізованого рухомого складу і колії при дискретній підрейковій основі з нелінійними пружно-динамічними характеристиками.
2. Удосконалення моделей і методів визначення просторових пружно-динамічних характеристик дискретних рейкових опор з урахуванням умов і термінів їх експлуатації, рівня діючих сил.
3. Дослідження закономірностей формування і розвитку геометричних нерівностей плану і профілю колії промислових підприємств як джерел вимушених коливань рухомого складу.
4. Обгрунтовування і розробка комплексу математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж-колія» з урахуванням особливостей характеристик спеціального і спеціалізованого рухомого складу промислового транспорту.
5. Розробка функціональних моделей елементів верхньої будови колії - рейок, елементів скріплень, шпал, баласту на основі використовування методу кінцевих елементів (МКЕ).
6. Розробка методу синтезу моделей елементів верхньої будови колії МКЕ на основі формування модульної концепції моделювання.
7. Порівняльна оцінка відомих і запропонованих методів досліджень напружений-деформованого стану елементів колії на основі даних експериментальних досліджень.
8. Створення наукових підходів до визначення критичних станів колії промислових залізниць, при яких можлива відмова системи «екіпаж – рейкова колія», встановлення безпечних умов експлуатації колії в таких станах, надання рекомендацій щодо планування попереджувальних і ремонтних робіт для підвищення загальних ресурсів роботи промислового транспорту.

Об'єкт дослідження – ресурси роботи промислового транспорту.

Предмет дослідження – вплив стану системи «екіпаж – рейкова колія» на ресурси роботи промислового транспорту.

Методи досліджень:

- аналітичні методи теоретичної і будівельної механіки з використанням теоретичних просторових моделей для розробки загального методу визначення сил взаємодії рухомого складу і колії;
- метод кінцевих елементів - для розрахунків і аналізу просторового напружено - деформованого стану елементів верхньої будови колії;
- методи експериментальних досліджень роботи елементів верхньої будови колії.

Наукова новизна одержаних результатів:

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні наукових основ підвищення ресурсів роботи промислового транспорту за рахунок підвищення достовірності діагностики стану системи «екіпаж – рейкова колія» шляхом розвитку і вдосконалення моделей і методів визначення дії на колію спеціального і спеціалізованого рухомого складу та досліджень напружено-деформованого стану колії, які, на відміну від відомих раніше, враховують

дискретність просторових пружно-дисипативних характеристик підрейкової основи, при цьому вперше:

- розроблена концепція визначення вертикальних та горизонтальних поперечних сил взаємодії рухомого складу і колії при дискретній підрейковій основі з нелінійними пружно-динамічними характеристиками. На відміну від існуючих моделей і методів концепція враховує нерівнопружність підрейкової основи, нелінійність просторової жорсткості рейкових опор, дисипацію рейкових опор в горизонтальному поперечному напрямку, вплив рівня навантажень, умов і термінів експлуатації колії на ці параметри, їх статистичний характер;

- розроблений комплекс моделей і методів для визначення просторових пружно-динамічних характеристик дискретних рейкових опор з урахуванням особливостей і термінів їх експлуатації, які дозволяють, на відміну від існуючих, враховувати рівень діючих навантажень на опори, конструктивні особливості колії промислового транспорту, терміни експлуатації колії; вперше визначені для умов промислового транспорту характеристики дисипації рейкових опор в горизонтальному поперечному напрямку з урахуванням їх змін в процесі експлуатації;

- для умов промислового транспорту одержані емпіричні залежності розвитку нерівностей плану і профілю колії від узагальнюючого чинника силової дії рухомого складу на колію - пропущеного по ділянках тоннажу; залежності враховують, на відміну від досліджень, що виконувалися раніше, рівень осьових навантажень, умови плану залізничних ліній;

- розроблено комплекс багатофакторних математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж-колія», які, на відміну від відомих, враховують конструктивні особливості спеціальних вагонів промислового транспорту, а також режими виштовхування потягів; в комплексі моделей враховані дискретність рейкової основи, нелінійність пружно-динамічних характеристик опор, статистичний характер цих характеристик.

Вдосконалені:

- методи розрахунку рейок на вигин як балок на дискретних опорах з нелінійними характеристиками; рішення задачі в матричній формі з використанням рівнянь Крамера дозволяє, на відміну від відомих методів, враховувати вплив динамічного навантаження, що рухається;

- методи розрахунку рейок на кручення при дії динамічних сил, які, на відміну від відомих методів, враховують розривність функцій крутних моментів.

Отримали подальший розвиток:

- комплекс функціональних моделей елементів верхньої будови колії на основі використовування МКЕ, що дає можливість, на відміну від використовуємих методів, визначати об'ємний напружений-деформований стан елементів верхньої будови колії, встановлювати місця концентрації напруг, набувати числові значення діючих напруг в будь-якій точці елемента колії;

- метод синтезу моделей елементів верхньої будови колії МКЕ на основі формування модульної концепції моделювання, що дозволяє розв'язати проблему поганої обумовленості матриці жорсткості з різко відмінними жорсткосними параметрами;

- метод отримання кількісних показників стану системи «екіпаж – рейкова колія» в умовах промислового транспорту на основі застосування апарату теорії надійності, на відміну від існуючих, метод дає можливість врахувати вплив багатофакторних змін характеристик колії під час експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення отриманих в дисертації результатів досліджень полягає в тому, що запропоновані і обґрунтовані моделі і методи дозволяють встановлювати допустимі значення швидкостей руху спеціальних і спеціалізованих вагонів промислового транспорту в залежності від технічного стану колії, визначити граничні значення вертикальних і горизонтальних нерівностей колії, що сприятиме підвищенню ресурсів роботи промислового транспорту.

Ефективність та високий ступінь формалізації комплексів моделей, методів, процедур розрахунків дозволяють безпосередньо їх застосовувати в розрахунковій та проектній практиці

при вирішенні широкого класу задач динаміки колії і рухомого складу, розрахунків напружено - деформованого стану елементів колії.

Розроблені моделі і методи, алгоритми і програми розрахунків використовуються для визначення сфер застосування як існуючих типів і конструкцій елементів верхньої будови колії, так і для розробки і проектування спеціальних конструкцій для умов промислового транспорту (акти впровадження ЗАТ «Донецьксталь - МЗ» та ЗАТ «Макіївський коксохімічний завод »).

Рекомендації про необхідні характеристики елементів верхньої будови колії, умови експлуатації, терміни проведення ремонтних робіт, які отримані на підставі досліджень дисертаційної роботи, впроваджені на підприємствах: Луганська ТЕС «Східенерго», ДП ЗАТ «Трест Донбастрансбуд Краснолиманський піщаний кар'єр», ЗАТ «Донецьксталь - МЗ», ЗАТ «Макіївський коксохімічний завод», ВАТ «Стахановський вагонобудівний завод», Харківське комунальне підприємство «Міськелектротранс», Харківська філія ПРАТ «Київ-Дніпровське» МППЗТ.

Представлена в дисертації відеоцифрова система вимірювань переміщень, що дозволяє з точністю до 0,02-0,05 мм дистанційно вимірювати динамічні переміщення і деформації об'єктів, може використовуватися в техніці, промисловості, будівництві, при проведенні наукових експериментів.

Теоретичні результати, одержані при виконанні дисертаційної роботи, використовуються в курсах дисциплін «Улаштування і експлуатація колії», «Колійне господарство», «Організація і планування ремонтно-колійних робіт в умовах обмежених ресурсів», в дипломному проектуванні і при підготовці фахівців і магістрів в Інституті перепідготовки і підвищення кваліфікації УкрДАЗТ. Практичне упровадження результатів роботи підтверджено відповідними документами, які дані в додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, розробки і результати досліджень, які виносяться на захист, одержані автором. Особистий внесок здобувача в роботи, опубліковані в співавторстві:

- ідея і розробка методів розрахунків впливу подовжніх сил, що виникають в потягу, на величини горизонтальних поперечних сил, діючих на колію в кривих [2];
- ідея і розробка методів визначення подовжніх жорсткостей рейкових опор при дерев'яних і залізобетонних шпалах, методика вживання апарату теорії надійності для оцінки противоугонних здібностей рейкових опор [2;16];
- планування і проведення експериментальних робіт за визначенням просторових жорсткостей скріплень і шпал, аналіз одержаних результатів [5;9;10;12;15;17;19;31];
- ідея і розробка відеоцифрової системи вимірювань переміщень елементів верхньої будови колії [18;33];
- розробка методу розрахунку рейки як балки на дискретних упруго-диссипативных опорах з випадковими характеристиками [21;22;34];
- ідея, постановка задачі, визначення граничних умов і розрахункових характеристик моделей елементів верхньої будови колії методом кінцевих елементів, аналіз результатів розрахунків [29].

Особисто претендентом без співавторів опубліковано 1 монографія та 16 робіт в журналах і збірниках наукових праць.

Апробація робіт. Основні положення дисертації, результати теоретичних і експериментальних досліджень, докладалися на 47-й - 55-ій науково - технічних конференціях кафедр Харківського інституту інженерів залізничного транспорту; (1985-1993г); на засіданнях Науково - технічної ради Центрального проектно - конструкторського і технологічного бюро Головного транспортного управління Мінчермета СРСР (ЦПКТБтрансчермет) - 1985-1988годах; на засіданнях Технічної ради Головного транспортного управління Мінчермета СРСР - 1985-1989годах; на 56-63 науково - технічних конференціях кафедр і фахівців залізничного транспорту Харківської державної академії залізничного транспорту; (1994-2001г); на 64-67 міжнародних науково - технічних конференціях кафедр і фахівців залізничного транспорту (м. Харків) 2002-2005годах; на 69-72 міжнародних науково - технічних

конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту, інженерно - технічних працівників залізничних підприємств і організацій України і інших країн (2006-2010г); на Міжнародній науково - технічної конференції «Проблеми ресурсозберігання на транспорті» (м. Харків 2006г); на 70 Міжнародної науково - практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.А. Лазаряна (м. Дніпропетровськ) 2010г; на 73 науково - технічної конференції української державної академії залізничного транспорту (м. Харків, 2011г); на 3-їй Міжнародної науково - технічної конференції за будівельними "Проблеми надійності і довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті" (м. Харків 2011г).

Дисертаційна робота повністю докладалася на наукових семінарах кафедр «Колія і колійне господарство», «Будівельна механіка і гідравліка», «Будівельні матеріали, конструкції і споруди» Української державної академії залізничного транспорту (24.11.2010р., 05.09.2011р. та 10.01.2012р.), на розширеному засіданні кафедри «Колія і колійне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту им. ак. В.А. Лазаряна, на Міжвузівському семінарі з апробації дисертаційних досліджень (м. Харків, 17.03.2011р.), на науковому семінарі Державного науково-дослідного центру залізничного транспорту за участю фахівців Державного економіко-технологічного університету транспорту (м. Київ, 17.06.2011р.) і на засіданні секції №1 наукового семінару при спеціалізованій вченій раді Д 29.051.03 Східноукраїнського Національного університету ім. В.Даля (м. Луганськ, 18.04.2012 р.).

Публікації. Основні результати роботи викладені у 34 наукових роботах, в тому числі в 1 монографії, 31 статті, які опубліковані в збірниках наукових праць і журналах рекомендованих ВАК України та один патент на корисну модель. В додатковий список включені 5 робіт, в тому числі три навчальні посібники, які були видані з грифом «Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальній посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом «Залізничний транспорт».

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, восьми розділів, основних висновків, списку використаних джерел з 362 найменувань та додатків. Загальний обсяг основного тексту 317 сторінок друкованого тексту, 135 рисунків, 42 таблиць. Додатки, де наведені результати розрахунків просторової жорсткості рейкових опор, текст програми розрахунків сил впливу рухомого складу на колію, результати розрахунків сил, що діють на колію в умовах експлуатації промислового транспорту, результати розрахунків напружено - деформованого стану колії, результати експериментальних робіт, акти впровадження. Додатки складають 108 сторінок.

Автор висловлює глибоку вдячність своєму науковому консультанту доктору технічних наук, професору Е.Д. Чихладзе за допомогу в підготовці дисертаційної роботи.

Основний зміст роботи

У вступі обгрунтована актуальність, сформульовані мета і завдання досліджень, викладено їх зв'язок з науковими темами та програмами, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію і публікації отриманих результатів. Викладена загальна характеристика дисертації.

У першому розділі роботи викладено загальний підхід до вирішення проблеми підвищення ресурсів роботи промислового транспорту. На підставі аналізу відмов роботи системи «екіпаж – рейкова колія» зроблен висновок, що вплив конструкції та стану колії на ці відмови визначається рівнем динамічних сил, діючих на колію від рухомого складу і напруженнями в елементах колії, що виникають під дією цих сил. В свою чергу на рівень сил впливають як характеристики рухомого складу, так і характеристики колії, до яких відносяться умови плану і профілю, тип рейок, пружні і дисипативні характеристики рейкових опор та відступи від норм утримання-нерівності колії. Знаючи значення цих параметрів, закономірності їх змін в часі і маючі достовірні, для умов промисловго траспорту, методи визначення сил взаємодії рухомого складу і колії і методи визначення напруженого стану елементів колії,

можна визначати заходи для підвищення ресурсів роботи промислового транспорту. Передбачається за допомогою методів теорії надійності визначити критичні, з точки зору роботи системи «екіпаж – рейкова колія», стани колії та заходи щодо експлуатації колії в таких умовах.

Виконано аналіз експлуатаційних умов роботи колії на промисловому транспорті та розвитку теорій взаємодії рухомого стану і колії, розрахунків елементів колії.

Норми проектування колії промислового транспорту допускають улаштування кривих з радіусами від 160 до 80 м і менше. Керівні ухили ліній на коліях металургійного виробництва допускаються до 30 ‰, на гірничодобувних підприємствах до 60 ‰.

Спеціальні та спеціалізовані вагони промислового транспорту характеризуються високими осьовими навантаженнями (294-560 кН), збільшеною жорсткістю ресорних комплектів, підвищеною необресореною масою, малими діаметрами коліс 0,65-0,84 м і короткими (до 1,3 м) жорсткими базами. В якості основних локомотивів на металургійних підприємствах використовуються маневрові тепловози з електричною і гідравлічною передачею; на гірничодобувних підприємствах - промислові електровози і тягові агрегати, що мають осьові навантаження 250-300 кН і розвивають зусилля тяги до 1200 кН.

Обстеження фактичних умов експлуатації колій підприємств чорної металургії, яке виконане на восьми металургійних заводах і чотирьох гірничодобувних підприємствах Україні показало, що довжина кривих ділянок колії становить 40-60% розгорнутої довжини, у тому числі до 20% - з радіусами менше 300 м.

Найбільше поширення мають рейки типу Р65 (до 80%), у тому числі старопридатні. Розгорнута довжина колії на залізобетонних шпалах становить від 50% до 80%, при цьому залізобетонні шпали експлуатуються, в основному, в ланковій колії з рейками довжиною 25 і 12,5 м.

Швидкості руху рухомого складу промислового транспорту значно менші, ніж магістрального. На коліях відкритих гірських розробок вони не перевищують 40 км / год, на з'єднувальних коліях металургійних підприємств - 10-15 км / год, а на дільницях перевезень розплавленого чавуну, сталі в виливницях - 3-6 км / год.

На металургійних заводах широко застосовується колія з заглибленою баластною призмою, частка таких колій може досягати 60%. Така конструкція в поєднанні з високою засміченістю баласту і підвищеною вологістю створює значну нерівнопружність рейкошпальної основи.

Вантажонапруженість діяльних колій металургійних і гірничодобувних підприємств сягає 12-15 млн.т, що можна порівняти з вантажонапруженістю магістральних залізниць. Найбільші значення вантажонапруженості мають місце на коліях руху спеціального рухомого складу з високими осьовими навантаженнями.

Перший розділ присвячений також аналізу розвитку теорій розрахунків колії.

Перші розрахунки рейкової колії на міцність були виконані у другій половині XIX століття П.П. Мельниковим, Д.І. Журавським, Ф. Ернольдом, Ф. Ціммерманом, А.А. Холодецким, В.Г. Бобильовим, В.В. Григор'євим і рядом інших вчених. При цьому колія розглядалась як балка на багатьох, спочатку жорстких, а потім пружних (Ф. Ціммерманом, 1888 р.) опорах. Академік Н.П. Петров в 1907 р. вперше виконав розрахунок рейки як балки на пружній основі. Н.П. Петровим були розроблені основи теорії взаємодії колії та рухомого складу, дані основні ідеї застосування теорії ймовірностей до розрахунків колії.

Проф. С.П. Тимошенко в 1926 р. розробив найбільш вживану до теперішнього часу теорію кручення рейки під дією горизонтальних поперечних сил.

Ідеї Н.П. Петрова і С.П. Тимошенко були розвинені в роботах А.М. Годицького-Цвірко, Г.М. Шахунянца, Д.Г. Голованова, М.Л. Корольова, М.І. Кулагіна, К.П. Корольова, Н.К. Снітко, В.І. Ангелейко, О.П. Єршкова.

Великий внесок у розвиток теорії взаємодії колії та рухомого складу зробили академік В.А. Лазарян, професори С.В. Амелін, Е.М. Бромберг, М.Ф. Веріго, Н.А. Ковальов, А.Я. Коган, М.П. Смирнов, М.А. Фрішман, М.А. Чернишов, В.Ф. Яковлєв та інші.

Проф. Е.І. Даниленко і проф. В.В. Рибкін розробили в 2004 році «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» для магістральних доріг України, в яких використані загальні положення розрахунку колії як балки на суцільній пружній основі. У правила введені нові підходи до визначення модулів пружності рейкової основи, розрахунки поздовжніх сил, що діють на колію, стійкості рейкових плітей безстикової колії.

Наукові праці проф. Е.І. Даниленко визначили технічну політику магістральних залізниць України в сферах розробки сучасних конструкцій скріплень і шпал, стрілочних переводів. Е.І. Даниленко вніс значний вклад у розвиток теорії взаємодії колії та рухомого складу.

Колійна школа Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, створена акад. В.А. Лазаряном і проф. М.А. Фрішманом, під керівництвом проф. В.В. Рибкіна бере найактивнішу участь у розробці математичного забезпечення теорії взаємодії колії та рухомого складу, дослідженнях пружно-динамічних характеристик колії.

У ВНІІЖТі під керівництвом проф. М.Ф. Вериго і А.Я. Когана розроблені програмні пакети розрахунків взаємодії колії та рухомого складу, в основу яких покладені розрахункові схеми колії у вигляді балок на суцільній пружній основі. При цьому колія має постійні по довжині масу, жорсткість і демпфування. Для умов магістральних залізниць розрахунки, що виконуються з використанням цих програмних пакетів, дають хорошу збіжність з даними експериментів. Проте ряд вчених (проф. В. Ф. Яковлєв, проф. К. Д. Білих та інші) зазначають, що для умов промислового транспорту схема розрахунку колії як балки на суцільній пружній основі надмірно ідеалізує колію, її технічний стан і дає занижені результати.

В.Ф. Яковлєв, К.Д. Білих І.І. Семенов, Н.С. Нікеров, М.П. Смирнов розробили способи розрахунку колії як просторової стержневої системи під дією статичних просторових сил. Їх дослідження показали, що застосування методу пружної основи дає для умов промислового транспорту занижені результати. Ці висновки підтверджені в роботах проф. Ю.Д. Волошко, проф. В.В. Рибкіна і В.І. Климова при розрахунках колії як балки на нерівнопружних опорах, жорсткість яких має статистичний характер, і на пружних опорах з нелінійною жорсткістю.

На підставі аналізу існуючих теорій взаємодії колії та рухомого складу і теорій розрахунків напружено-деформованого стану колії в дисертації прийнята основна розрахункова схема колії у вигляді просторової конструкції, що складається з рейок - балок, що спираються на окремі пружно-дисипативні опори - шпали.

Використання в розрахунках взаємодії такої схеми дозволяє враховувати нерівнопружність рейкової основи, яка викликана дискретним обпиранням рейок, враховувати відмінності в жорсткості і параметрах дисипації окремих опор, нелінійність цих характеристик.

В кінці розділу сформульовано мету і завдання досліджень.

У другому розділі наведені результати досліджень просторової жорсткості рейкових опор в умовах промислового транспорту та її змін у процесі експлуатації. Розглядалася жорсткість опор при найбільш поширених видах рейкової основи - залізобетонних шпалах типу Ш-1 із скріпленням КБ і дерев'яних шпалах першого типу зі скріпленням ДО.

Жорсткості рейкових опор при вертикальних і горизонтальних поперечних навантаженнях розглядалися як системи з послідовно з'єднаних жорсткостей проміжних скріплень і жорсткостей систем шпали - баласт. У свою чергу просторові жорсткості вузлів проміжних скріплень представлені як системи послідовно і паралельно з'єднаних жорсткостей входячих до них пружних елементів - нашпальних і підрейкових прокладок, деревини шпали під підкладкою, клемних прикріплювачів, закладних болтів і костилів. Отримано розрахункові рівняння, що дозволяють розраховувати просторові жорсткості скріплень в залежності від рівня діючих на вузли скріплень вертикальних навантажень. Визначено перелік залежностей змін характеристик жорсткостей пружних елементів, які підлягають встановленню в процесі експлуатації колії.

Дослідженнями в лабораторних умовах визначені жорсткості при стисненні статичними і динамічними навантаженнями найбільш вживаних типів підрейкових і нашпальних прокладок скріплення КБ (таблиця 1). Прийняті діапазони навантажень при дослідженнях динамічної

жорсткості прокладок відповідають вертикальним навантаженням на скріплення при русі екіпажів з осьовими навантаженнями до 265 кН, до 343 кН і до 440 кН.

Встановлено збільшення динамічної жорсткості прокладок на 37 - 89% у порівнянні зі статичною жорсткістю, що узгоджується з даними інших дослідників.

Встановлено зростання динамічної жорсткості зі збільшенням інтервалів вертикальних навантажень на 12 - 22%.

Для визначення змін динамічної жорсткості прокладок при стисненні в процесі експлуатації, були випробувані прокладки, які зняті після 10-18 років роботи в колії. Встановлено, що їх жорсткість збільшилася на 19-27%. Залежності змін жорсткості від строків їх служби наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Жорсткості прокладок скріплення КБ при стисненні і залежності їх змін від термінів експлуатації (років)

Тип прокладки	Статична жорсткість (кН/м)	Динамічна жорсткість (кН/м) Діапазони навантажень (кН)			Емпірична залежність $U_{пр}^{дин}=f(t)$ (кН/м)
		40-60	60-80	80-100	
1	2	3	4	5	6
ЦП-143	$8{,}63\cdot10^4$	$11{,}9\cdot10^4$	$12{,}9\cdot10^4$	$13{,}4\cdot10^4$	$U_{пр}^{дин}(t)=U_{пр}^{дин}+0{,}08\cdot10^4 t$
ЦП-260	$11{,}83\cdot10^4$	$17{,}3\cdot10^4$	$19{,}0\cdot10^4$	$19{,}9\cdot10^4$	$U_{пр}^{дин}(t)=U_{пр}^{дин}+0{,}16\cdot10^4 t$
ЦП-153	$15{,}96\cdot10^4$	$22{,}3\cdot10^4$	$24{,}9\cdot10^4$	$26{,}2\cdot10^4$	$U_{пр}^{дин}(t)=U_{пр}^{дин}+0{,}28\cdot10^4 t$
ЦП-163	$12{,}45\cdot10^4$	$17{,}5\cdot10^4$	$19{,}3\cdot10^4$	$20{,}2\cdot10^4$	$U_{пр}^{дин}(t)=U_{пр}^{дин}+0{,}17\cdot10^4 t$

Жорсткості прокладок скріплення КБ при їх роботі на зсув під дією горизонтальних сил були визначені в залежності від величини їх стиснення вертикальними силами (таблиця 2).

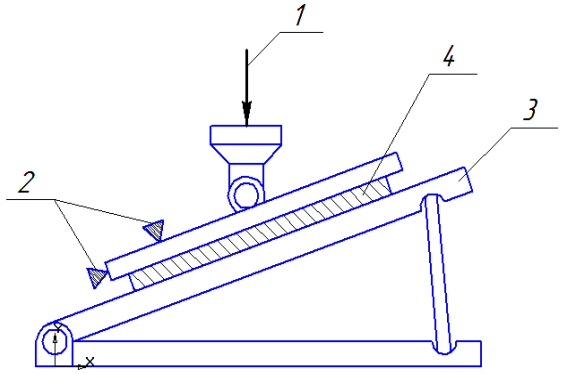


Рис.1 Схема установки для випробувань прокладок:
1-навантаження;
2-датчики переміщень;
3 - робочий майданчик;
4 - прокладки;

Для цих випробувань використовувалася установка, схема якої наведена на рис 1. Випробування проводилися під дією пульсуючого динамічного навантаження в діапазонах 40-60, 60-80 і 80-100 кН, при цьому кут нахилу робочого майданчика змінювався, створюючи різні співвідношення стискаючих і зсуваючих навантажень.

У таблиці 2 також дані залежності змін жорсткостей прокладок при зсуві від термінів їх роботи у колії, які встановлені на підставі випробувань прокладок, що були в експлуатації.

Таблиця 2

Залежності змін жорсткостей прокладок при зсуві від величини їх стиснення Δh (м) і термінів їх служби t (років)

Тип прокладки	$U_{пр}^{г}=f_1(\Delta h)(кН/м)$	$U_{пр}^{г}(t)=f(t)(кН/м)$
ЦП-143	$2{,}8\cdot10^4+166{,}4\cdot10^5\Delta h^{0.981}$	$U_{пр}^{г}(t)=U_{пр}^{г}+0{,}11\cdot10^4 t$
ЦП-260	$4.3\cdot10^4+337.3\cdot10^5\Delta h^{0.985}$	$U_{пр}^{г}(t)=U_{пр}^{г}+0{,}22\cdot10^4 t$
ЦП-153	$5.07\cdot10^4+2354\cdot10^5\Delta h^{0.983}$	$U_{пр}^{г}(t)=U_{пр}^{г}+0{,}31\cdot10^4 t$
ЦП-163	$2{,}12\cdot10^4+1402\cdot10^5\Delta h^{0.982}$	$U_{пр}^{г}(t)=U_{пр}^{г}+0{,}25\cdot10^4 t$

Експериментальними роботами в лабораторних умовах визначена жорсткість закладних болтів скріплення КБ при поперечних переміщеннях підкладки.

Значення просторових жорсткостей скріплення КБ, які отримані розрахунками на підставі даних про жорсткість їх пружних елементів, були перевірені експериментально при статичних і динамічних навантаженнях в лабораторних умовах і в колії.

Для скріплень ДО експериментально визначені коефіцієнти постілі підкладок, що характеризують пружні властивості деревини шпали при її зминанні і стисненні у поперек волокон, і жорсткості костилів при їх поперечному отжатии. Отримано залежності змін цих параметрів при роботі в колії. Такі дані дозволяють розраховувати значення просторових жорсткостей вузла скріплення типу ДО та їх зміни в залежності від часу роботи в колії (рис. 2).

Експериментальні роботи, проведені на 21 ділянці колії металургійних і гірничодобувних підприємств, дозволили встановити параметри жорсткостей залізобетонних і дерев'яних шпал при їхньому завантаженні статичними і динамічними вертикальними і горизонтальними поперечними силами.

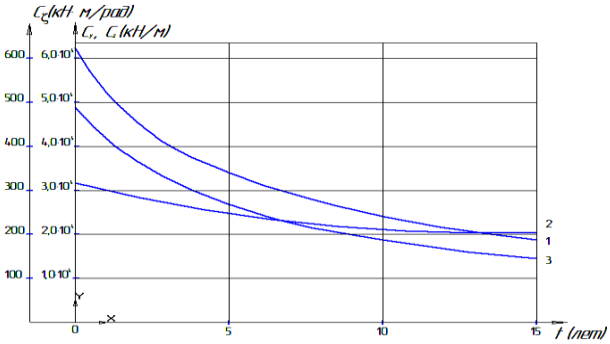


Рис. 2 Залежність змін просторової жорсткості скріплень ДО в процесі експлуатації:
1-вертикальна Cy (кН / м);
2-горизонтальна поперечна Cz (кН / м);
3-при крученні рейки (кН • м / рад).

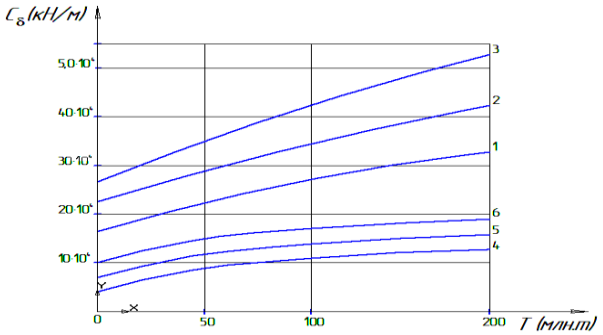


Рис. 3 Залежність змін коефіцієнтів постілі шпал від величини пропущеного тоннажу:
1,2,3 - залізобетонні шпали, осьові навантаження до 205 кН, до 294 кН і понад 294 кН відповідно;
4,5,6 - дерев'яні шпали осьові навантаження до 205 кН, до 294 кН і понад 294 кН.

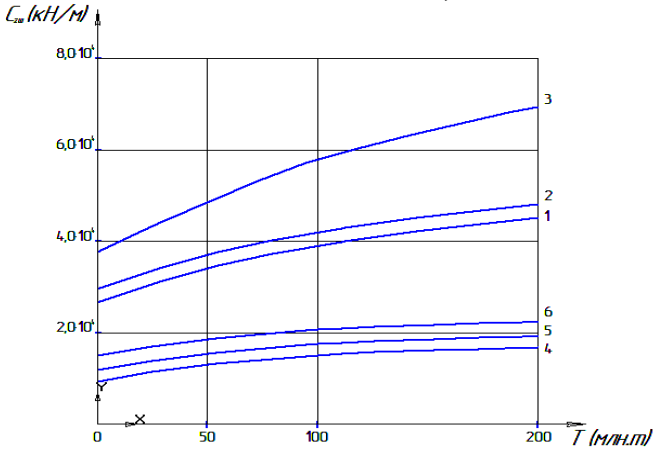


Рис. 4 Залежності змін горизонтальної поперечної жорсткості шпал від величини пропущеного тоннажу:
1,2,3 - залізобетонні шпали, при осьових навантаженнях 265, 294 і 441 кН;
4,5,6 - дерев'яні шпали, при осьових навантаженнях 265, 294 і 450 кН.

Для розрахунків вертикальних жорсткостей систем "шпали - баласт" були отримані залежності змін коефіцієнтів постілі шпал з ростом пропущеного тоннажу та з урахуванням впливу рівня діючих вертикальних навантажень (рис.3).

Для заглибленої або напівзаглибленої баластної призми поправочний коефіцієнт дорівнює 0,93 для залізобетонних і 0,97 для дерев'яних шпал. У зимових умовах коефіцієнт постілі шпал зростає в 1,8 рази для залізобетонних і в 1,6 рази для дерев'яних шпал.

Залежності змін горизонтальної поперечної $C_{zш}$ жорсткості від експлуатаційних параметрів колії промислового транспорту наведені на рис. 4.

При заглибленій або напівзаглибленій баластній призмі горизонтальні жорсткості зростають в 1,20-1,22 рази при залізобетонних і в 1,15-1,19 рази при дерев'яних шпалах. У зимовий час збільшення горизонтальних жорсткостей шпал складає 1,8.

Виконані дослідження дозволили визначати значення просторової жорсткості рейкових опор в різних умовах експлуатації колії промислового транспорту і прогнозувати їх зміни з часом.

Дослідження показали, що значення жорсткостей рейкових опор в умовах промислових залізниць змінюються в широких межах. Так, при залізобетонних шпалах і скріпленні КБ вертикальна жорсткість опор змінюється від $3.3 \cdot 10^4$ кН / м до $8.2 \cdot 10^4$ кН / м, горизонтальна поперечна - від $0{,}96 \cdot 10^4$ кН / м до $2{,}41 \cdot 10^4$ кН / м, жорсткість при крученні рейки - від $162 \frac{кН \cdot м}{рад}$ до $354 \frac{кН \cdot м}{рад}$. Для дерев'яних шпал зміни вертикальної жорсткості складають $1{,}54 - 2{,}75 \cdot 10^4$ кН / м, горизонтальної поперечної - $0{,}39 - 2{,}25 \cdot 10^4$ кН / м, жорсткість при крученні - $495 - 182 \frac{кН \cdot м}{рад}$ (рис 5-8). Головними експлуатаційними чинниками, що впливають на ці зміни, є терміни експлуатації колії і рівень осьових навантажень.

Графіки залежностей змін просторової жорсткості рейкових опор

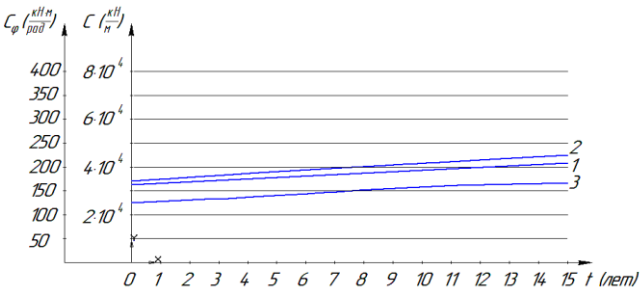


Рис. 5 Осьові навантаження до 265 кН і обсяг перевезень 3 млн.т / рік, залізобетонні шпали, скріплення КБ

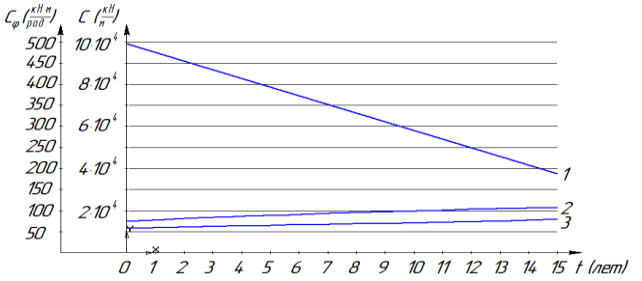


Рис. 6 Осьові навантаження до 265 кН і обсяг перевезень 3 млн.т / рік, дерев'яні шпали, скріплення ДО

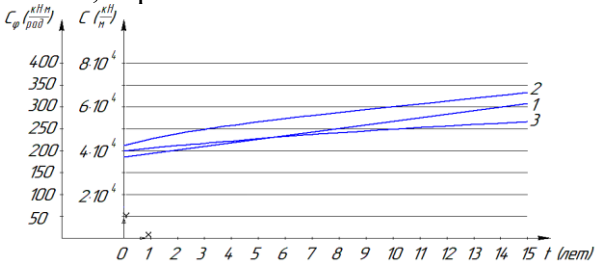


Рис. 7 Осьові навантаження до 450 кН і об'єм перевезень 10 млн.т / рік, залізобетонні шпали, скріплення КБ.

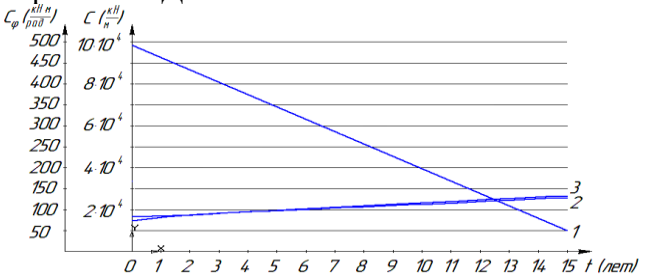


Рис. 8 Осьові навантаження до 450 кН і об'єм перевезень 10 млн.т / рік, дерев'яні шпали, скріплення ДО.

Третій розділ дисертації присвячений розробці методики визначення непружних опорів рейкових опор просторовим переміщенням.

На підставі аналізу залежностей між деформаціями опор і силами, які їх викликають при навантаженні і розвантаженні (рис. 9), зроблено висновок про те, що сили внутрішнього тертя у колії залежать не тільки від величини, пропорційної деформаціям (сухе тертя), а й від швидкостей деформацій , прискорень, і від інших динамічних параметрів.

Використання в розрахунках колії параметрів сухого тертя викликає складності, оскільки ці параметри описуються розривними функціями, вимагають введення в алгоритми розрахунків додаткових умов перевірки наявності таких сил і суттєво збільшують тривалість розрахунків.

Тому непружні опори деформаціям запропоновано враховувати за допомогою еквівалентного коефіцієнта дисипації опор, який, як розрахункова величина, повинен враховувати всі втрати енергії при дії всіх дисипативних сил – які залежать від деформації, її швидкості, прискорення і т.п. Найбільш точно це завдання може бути вирішено при використанні даних про пружні характеристики рейкових опор при їх навантаженні і розвантаженні динамічними силами від рухомого складу, які отримані експериментально. Це завдання вимагає застосування високоточної мікропроцесорної та комп'ютерної техніки для реєстрації в цифровому вигляді даних про сили і деформації і подальшого точного суміщення цих масивів даних.

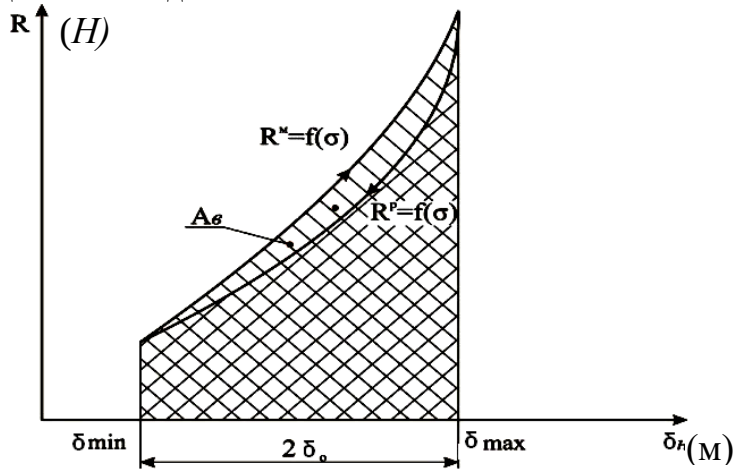


Рис. 9 Петля гістерезису рейкової опори для визначення роботи сил непружних опорів

Залежності між силами і викликаними деформаціями опори, які називаються пружними характеристиками, утворюють петлю гістерезису (рис. 9). Площа цієї петлі визначає роботу всіх сил непружного опору рейкової опори.

Непружна (дисипативна) складова сил опору опори $R_{дис}$ може бути виражена за допомогою еквівалентного коефіцієнта дисипації:

$$R_{дис}=\beta_{экв}\ \frac{d\delta}{dt}. \tag{1}$$

Якщо апроксимувати пружні характеристики при навантаженні і розвантаженні опори показовими рівняннями виду:

$$R(\delta_{дин})=a+в\cdot\delta^{c}, \tag{2}$$

де *а,в,с* – емпіричні коефіцієнти, то площа петлі гістерезису Ав буде дорівнювати:

$$A_{в}=2\delta_0\left(a_{н}-a_{р}\right)+\frac{в_{н}}{c_{н}+1}\left(2\delta_0\right)^{C_{н}+1}-\frac{в_{р}}{c_{р}+1}\left(2\delta_0\right)^{C_{р}+1} \tag{3}$$

Тоді еквівалентний коефіцієнт дисипації можна визначити:

$$\beta_{экв}=\frac{A_{в}}{\pi\omega\,\delta_0^2},\ \left(\frac{н\cdot с}{м}\right) \tag{4}$$

де ω – кругова частота циклу навантаження - розвантаження $\left(с^{-1}\right)$;

δ_0 – динамічні деформації опори від положення статичної рівноваги (м).

За цією методикою були отримані значення еквівалентних коефіцієнтів дисипації рейкових опор при дії вертикальних і горизонтальних поперечних динамічних сил. Ці параметри визначені на підставі даних експериментальних робіт, проведених автором на колях металургійних і гірничодобувних підприємств України в 2008-2009 роках. Залежності змін еквівалентних коефіцієнтів дисипації опор від величини пропущеного по ділянках колії тоннажу наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Залежності змін еквівалентних коефіцієнтів дисипації рейкових опор від величини пропущеного по ділянках тоннажу (млн.т)

Параметр	Тип шпал	Осьові навантаження *(кН)*	Залежність $\beta_{эк\epsilon}$ ($кН \cdot с/м$)
1	2	3	4
Вертикальний еквівалентний коефіцієнт дисипації рейкової опори	Залізобетонні Ш – 1	<265	$\beta_{экв\,в} = 26{,}5 + 0{,}313T^{0{,}66}$
		265–294	$\beta_{экв\,в} = 31{,}3 + 0{,}329T^{0{,}68}$
		294–450	$\beta_{экв\,в} = 34{,}5 + 0{,}336T^{0{,}72}$
	Дерев'яні I тип	<265	$\beta_{экв\,в} = 16{,}0 + 0{,}205T^{0{,}65}$
		265–294	$\beta_{экв\,в} = 19{,}2 + 0{,}249T^{0{,}66}$
		294–450	$\beta_{экв\,в} = 20{,}8 + 0{,}260T^{0{,}72}$
Горизонтальний еквівалентний коефіцієнт дисипації рейкової опори	Залізобетонні Ш – 1	<265	$\beta_{экв\,г} = 18{,}0 + 0{,}292T^{0{,}51}$
		265–294	$\beta_{экв\,г} = 23{,}4 + 0{,}288T^{0{,}58}$
		294–450	$\beta_{экв\,г} = 25{,}2 + 0{,}188T^{0{,}67}$
	Дерев'яні I тип	<265	$\beta_{экв\,г} = 11{,}0 + 0{,}036T^{0{,}76}$
		265–294	$\beta_{экв\,г} = 13{,}9 + 0{,}059T^{0{,}74}$
		294–450	$\beta_{экв\,г} = 15{,}5 + 0{,}078T^{0{,}72}$

У зимовий час коефіцієнти дисипації зростають в 1,5-1,9 рази залежно від виду шпал та напрямку дії сил.

У четвертому розділі наведено результати досліджень розвитку геометричних нерівностей плану і профілю колій в умовах промислового транспорту. Такі нерівності є одним з джерел коливань рухомого складу, а їх характеристики дозволяють правильно оцінювати його вплив на колію.

Спостереження за розвитком нерівностей проводилися протягом чотирьох років на чотирнадцяти дослідних ділянках колії промислових підприємств з періодичною інструментальної зйомкою їх параметрів.

Для порівняльного аналізу характеристик нерівностей на дослідних ділянках колії використовувався безрозмірний параметр - нормована кореляційна функція $\rho(x)$.

Для згладжування випадкових відхилень і представлення функції в аналітичному вигляді нормована кореляційна функція апроксимована рівнянням:

$$\rho(x) = \ell^{-\alpha|x|}\cos\beta x \qquad (5)$$

де α и β - емпіричні коефіцієнти.

Ці коефіцієнти були визначені для нормованих кореляційних функцій вертикальних і горизонтальних нерівностей колій промислового транспорту в різних експлуатаційних умовах, які визначалися величиною пропущеного тоннажу, осьовими навантаженнями, радіусами кривих. Наприклад, на рисунку 10 наведено нормовані кореляційні функції вертикальних нерівностей для ділянок з осьовими навантаженнями 294 кН при різних значеннях пропущеного тоннажу, на рисунку 11 - функції горизонтальних нерівностей для ділянок колії з осьовими навантаженнями 294 кН після пропуску 174 млн.т вантажу в різних умовах плану лінії.

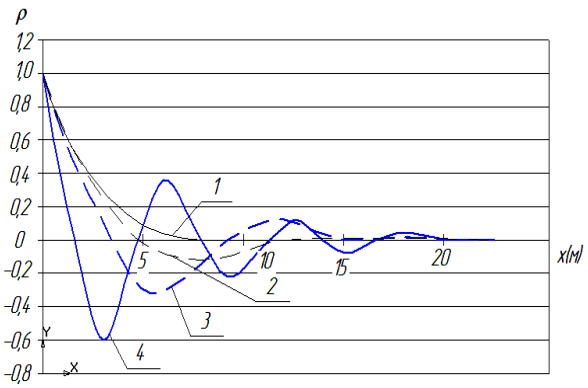


Рис. 10 Нормовані кореляційні функції вертикальних нерівностей колії на ділянках з осьовими навантаженнями 294кН після пропуску:
1 – 34 млн.т.;
2 – 92 млн.т.;
3 – 216 млн.т.;
4 – 370 млн.т.

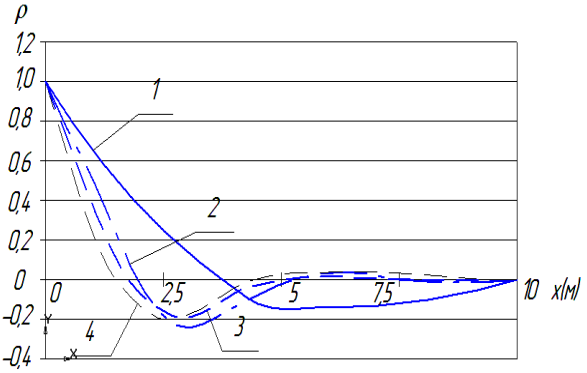


Рис. 11 Нормовані кореляційні функції горизонтальних нерівностей колії на ділянках з осьовими навантаженнями 294кН після пропуску 174 млн.т:1 – прямий відрізок колії;
2 – крива R=600м;
3 - крива R=450м;
4 - крива R=350м.

Встановлено зміни геометричних характеристик нерівностей колії - максимальної глибини вертикальних нерівностей, максимальної амплітуди горизонтальних нерівностей, їх повної довжини в процесі експлуатації колії залежно від величини пропущеного по колії тоннажу (рис. 12, 13). Визначено вплив осьових навантажень спеціального та спеціалізованого рухомого складу промислового транспорту на ці характеристики (рис. 14, 15), вплив кривизни плану ліній.

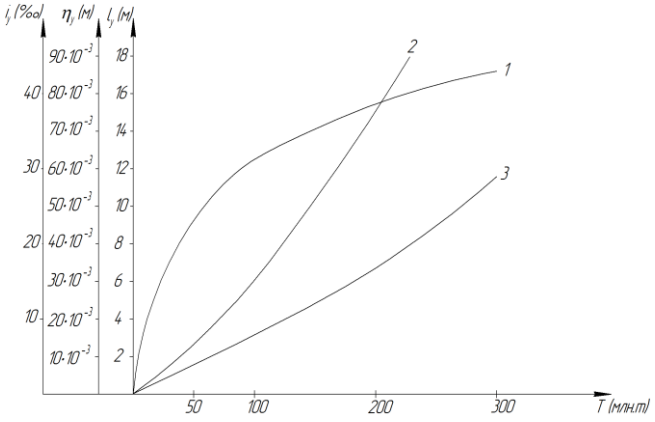


Рис. 12 Залежності змін характеристик вертикальних нерівностей колії на ділянках з осьовими навантаженнями 294кН в процесі експлуатації:
1 – загальна довжина нерівності ℓ_y;
2 – максимальна глибина η_y;
3 – середній ухил i_y.

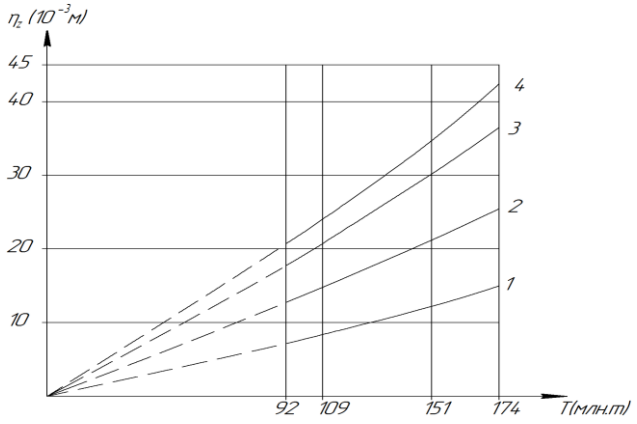


Рис. 13 Залежності змін максимальної амплітуди горизонтальних нерівностей колії в процесі експлуатації:
1 - пряма ділянка колії;
2 - крива R=600 м;
3 - крива R=450 м;
4 - крива R=350 м;

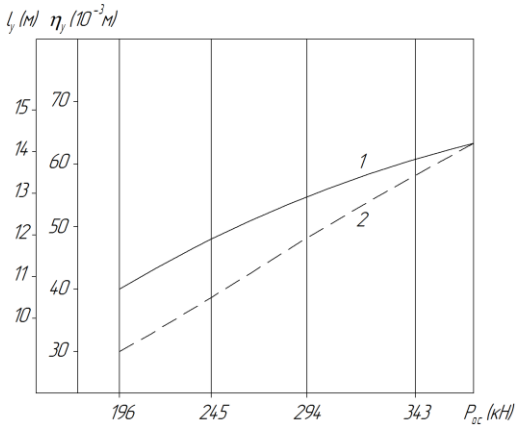


Рис. 14 Зміни характеристик вертикальних нерівностей колії залежно від осьових навантажень (пропущений тоннаж - 150 млн.т):

1 – повна довжина ℓ_y;

2 – максимальна глибина η_y

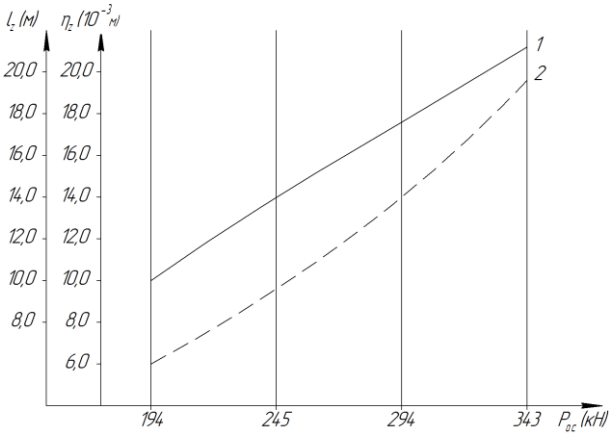


Рис. 15 Зміни характеристик горизонтальних нерівностей колії залежно від осьових навантажень (пропущений тоннаж - 150 млн.т):

1 – повна довжина ℓ_y;

2 – максимальна амплітуда η_z

Виконані дослідження дозволили отримати емпіричні залежності головних геометричних характеристик вертикальних і горизонтальних нерівностей від експлуатаційних параметрів колії промислового транспорту у вигляді:

$$\ell_y = \left(0{,}381 + 2{,}042 \cdot 10^{-3} P_{oc}\right) \cdot 2{,}467 \cdot T^{0{,}341} \quad (м)$$

$$\eta_y = \left(-0{,}337 + 4{,}841 \cdot 10^{-3} P_{oc}\right) \cdot 5{,}61 \cdot 10^{-5} T^{1{,}332} \quad (мм) \qquad (6)$$

$$\ell_z = 3{,}410 \cdot 10^{-3} P_{oc} \left(0{,}321 + 2{,}072 \cdot 10^{-4} K^{1{,}972}\right) T^{0{,}80} \quad (м)$$

$$\eta_z = \left(-0{,}445 + 4{,}915 \cdot 10^{-3} P_{oc}\right)\left(0{,}0403 + 1{,}105 \cdot 10^{-8} K^{1{,}582}\right) \cdot T^{1{,}135} \quad (мм)$$

де P_{oc} – статичні осьові навантаження рухомого складу (кН);

Т – пропущений по ділянці тоннаж (млн.т);

К – кривизна ділянки колії ($м^{-1}$).

П'ятий розділ присвячений розробці математичної моделі динамічної системи "екіпаж - колія" для чисельних досліджень взаємодії спеціальних та спеціалізованих вагонів промислового транспорту та колії.

В основу математичної моделі покладена просторова розрахункова схема чотирьохвісного екіпажу, що рухається по колії, яка представляє собою балки, щоі спираються на пружно-дисипативні опори - шпали з нелінійними характеристиками.

Динамічна підсистема "екіпаж", розрахункова схема якої наведена на рис. 16, розглянута як система твердих тіл, що володіють масою і моментом інерції, пов'язаних між собою кінетичними і силовими, в тому числі пружними і дисипативними зв'язками. Для цієї розрахункової схеми і прийнятих систем узагальнених координат складені диференціальні рівняння коливань з використанням рівнянь Лагранжа другого роду для неконсервативних систем:

$$m_j \cdot \ddot{q}_i + C_{ij} q_i + f_j C_{ij} q_i = Q(t) \qquad (7)$$

де q_i – узагальнені координати елементів підсистем "екіпаж";

m_j – інерційні параметри елементів;

C_{ij} – жорсткості зв'язків між елементами;

f_j – коефіцієнти сухого тертя в фрикційних гасителях коливань, на п'ятниках і ковзунах екіпажу;

$Q(t)$ – узагальнені внутрішні і зовнішні сили, що діють на елементи.

За умови, що екіпаж рухається з постійною швидкістю, його коливання описуються системою з 17 диференціальних рівнянь.

При моделюванні кінематичних і силових зв'язків між елементами підсистеми "екіпаж" їх взаємні можливі переміщення виражені через узагальнені координати. Визначено змінні сили сухого тертя, що розвиваються фрикційними

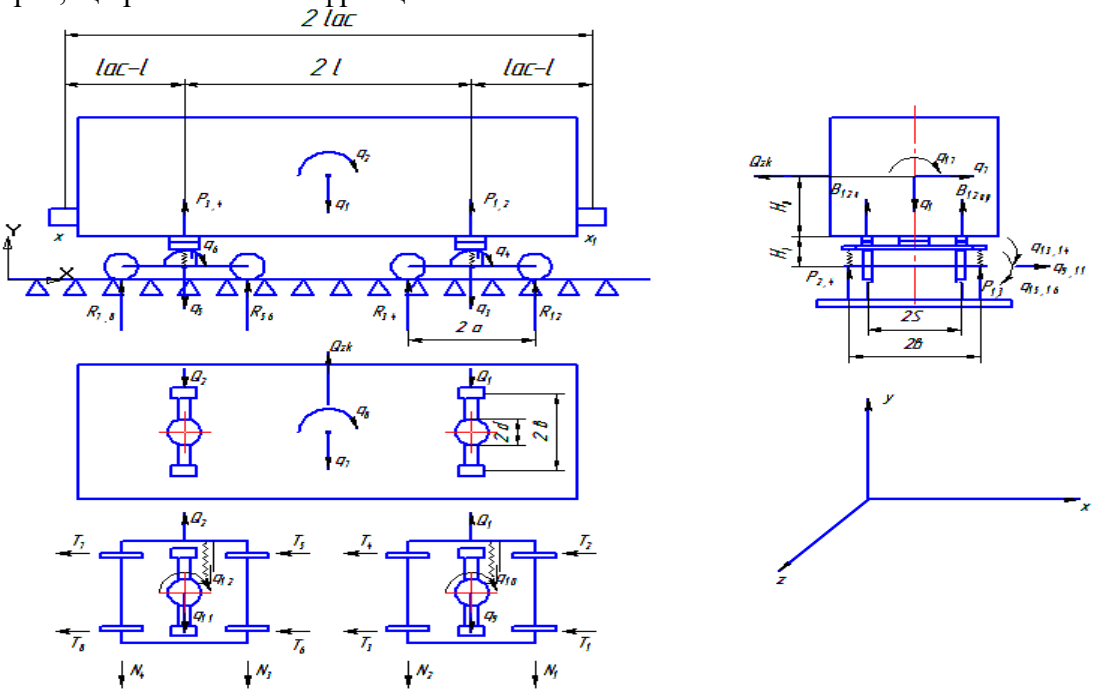


Рис. 16 Загальна розрахункова схема динамічної підсистеми «екіпаж»

гасителями коливань у вертикальній і горизонтальній площинах. При розрахунках сил взаємодії і моментів сил тертя, що виникають між кузовом і візками, врахована можливість спирання кузова як на п'ятник, так і на ковзуни візка та визначено умови таких обпирань. Введення в системи рівнянь елементів логіки дозволило розраховувати нелінійність виникаючих сил тертя.

В математичну модель включені поздовжні сили тяги, яка діють на екіпаж при його русі в потязі з постійною швидкістю. При цьому враховувалися такі особливості промислового залізничного транспорту як застосування режимів виштовхування потягів.

У вертикальні силові зв'язки між підсистемами "екіпаж" і "колія" введені пружно - дисипативні сили, які виникають в точці контакту колеса і рейки і додаткові динамічні сили, викликані можливим дисбалансом, нерівномірністю прокату колеса і ізольованими нерівностями на поверхні його кочення динамічні сили, які виникають при проходженні колесом рейкового стика. Вертикальні кінематичні зв'язки виражені через узагальнені координати для кожного колеса екіпажу з урахуванням ширини колісної пари, нахилу рейок і конічності поверхонь кочення коліс, можливої наявності вертикальних і горизонтальних геометричних нерівностей колії.

При розгляді умов контактування коліс і рейок в горизонтальній площині і визначенні горизонтальних силових зв'язків екіпажу та колії в поперечному і поздовжньому напрямках розглянута можливість появи як сил дійсного (сухого) тертя, так і псевдоковзання (кріппа). При цьому враховувалося жорстке попарне з'єднання коліс на одній осі, конічність їх поверхні кочення, перевищення рівня однієї рейки над іншою. Аналітично отримана умова появи нелінійних направляючих сил при контакті гребеня колеса з робочою гранню головки рейки. Переміщення колісних пар щодо рейкової колії визначені з урахуванням змін ширини колії в перехідних і кругових кривих і впливів вертикальних і горизонтальних нерівностей колії.

Вертикальні сили взаємодії підсистем «екіпаж» і «колія» і горизонтальні направляючі сили визначаються як:

$$R_{1\text{-}8} = c_в(\delta_{от} + \delta_{y1\text{–}8}) + \beta_в(\delta_{y1\text{–}8})\operatorname{sign}\delta_{y1\text{-}8} \quad (8)$$

$$N_{1\text{-}4} = c_г\delta_{z1\text{–}4} + \beta_г(\delta_{z1\text{–}4})\operatorname{sign}\delta_{z1\text{-}4} \quad (9)$$

де $c_в$, $c_г$ – приведені до точки контакту колеса і рейки вертикальні і горизонтальні жорсткості колії;

$\beta_в$, $\beta_г$ – приведені до точок контакту коефіцієнти дисипації колії у вертикальній і горизонтальній площинах;

δ_{yi}, δ_{zi} – динамічні деформації в точці контакту.

Значення приведених жорсткостей у будь-який момент часу t розраховуються за виразами:

$$c_в = \frac{1}{\delta_{egy}}; \qquad c_г = \frac{1}{\delta_{egz}} \quad (10)$$

де $\delta_{egy}, \delta_{egz}$ – динамічні деформації під впливом одиничного навантаження.

Одиничні динамічні деформації колії у вертикальній і горизонтальній площинах визначені при русі екіпажу на підставі розрахунків згину рейок з використанням загальної розрахункової схеми балки на пружно-дисипативних опорах.

При розрахунках згинів рейок з використанням рівнянь п'яти моментів, деформації будь - якоїопори визначаються виразом:

$$\delta_{oni} = \frac{1}{C_n}\left[R_n^0 + \frac{1}{\ell_{n+1}}(M_{N+1} - M_n) - \frac{1}{\ell_n}(M_n - M_{n-1})\right] \quad (11)$$

Для балки, що має постійну згинальну жорсткість, рівняння п'яти моментів має вигляд:

$$M_{n-2}\theta_{n,n-2} + M_{n-1}\theta_{n,n-1} + M_n\theta_{n1,n} + M_{n+1}\theta_{n,n+1} + M_{n+2}\cdot\theta_{n,n+2} + \Delta_{n,p} = 0 \quad (12)$$

де θ_n - дислокації балки над опорами.

Записуючи ці рівняння для кількості опор, необхідної в розрахунках, отримуємо n рівнянь з невідомими n опорними моментами M_i.

У матричній формі цю систему можна записати у вигляді:

$$A \cdot M = -H \quad (13)$$

де A – матриця жорсткостей рейкової нитки;

M – матриця - стовпець невідомих опорних моментів;

H – матриця - стовпець зовнішнього навантаження;

Елементи матриці М можна визначити, наприклад, за формулою Крамера, або іншими відомими методами.

Знаючи деформації опор, деформацію рейки в точці її контакту з колесом можна розрахувати як:

$$\delta_{egi} = \delta_n\frac{x_p}{l_n} + \delta_{n+1}\frac{(l_n - x_p)}{l_n} + \frac{(l_n - x_p)^2 x_p^{\,2}}{3EIl_n}, \quad (14)$$

де x_p – відстань від опори до точки прикладання навантаження.

L_n - відстань між опорами.

Пропонований спосіб розрахунку рейок як балок на пружно - дисипативних опорах дозволяє відносно просто автоматизувати розрахунковий процес.

Деформації рейок в горизонтальному поперечному напрямку визначені з урахуванням кручення рейки під дією бічних сил:

$$\delta_{egzi} = \delta_{Negi} + \varphi_{Negi}\cdot h_i \quad (15)$$

де δ_{Negi} - бічне віджимання центру крутіння перерізу рейки в результаті його горизонтального вигину;

φ_{Negi} - кут закручування рейки в точці його контакту з колесом;

h_i - відстань від поверхні кочення рейки до центру крутіння.

Для розрахунків кутів закручування рейок в точці контакту з колесом аналітично вирішена задача розрахунку крутіння рейки з використанням загального диференціального рівняння С.П. Тимошенко:

$$-C\frac{d\varphi}{dx}+ДЈ\frac{d^3\varphi}{dx^3}=M_к \tag{16}$$

Загальне рішення цього рівняння отримано у вигляді:

$$\varphi(x)=\frac{C_1}{к}shкh+\frac{C_2}{к}chкh-\frac{M(x)}{ДЈк^2}+C_3 \tag{17}$$

$$K=\sqrt{\frac{C}{Д\cdot h^2}}$$

де C – жорсткість рейки на крутіння;

$Д$ – приведена жорсткість головки і підошви рейки на вигин;

C_1, C_2, C_3 – постійні інтегрування.

Однак функція крутного моменту М (х) - кусочно-лінійна і не диференціюється в точках розташування опор.

Тому довільні постійні інтегрування C_1, C_2, C_3 - визначалися послідовно для різних прольотів з граничних умов, застосовуючи додаткові умови рівності кутів закручування рейок на опорах $\varphi_{з.п.i.}$ для різних прольотів.

Отримано розрахункові рівняння для визначення кутів закручування рейки на опорах $\varphi_{ОП}^{j}$ і в точці дії поперечної сили $N_{ед}$ з урахуванням її переміщення уздовж колії $x_р$.

У математичній моделі вертикальні і горизонтальні деформації рейок розраховуються для кожного колеса в матричній формі. Диференціюванням за часом в числовому вигляді елементів матриць-стовпців деформацій за допомогою вбудованої функції системи Mathcad можна отримати швидкості деформації і приведений до точки контакту j-го колеса і рейки еквівалентний коефіцієнт дисипації колії:

$$\beta_j=\sum_{1}^{\eta_{ti}}\beta_{экв}\cdot sign\dot{\delta}_{динij} \tag{18}$$

де η_{ti} - кількість рейкових опор в момент часу t, у яких при русі j-го колеса швидкість деформації відмінна від нуля;

$\beta_{экв}$ - еквівалентний коефіцієнт дисипації рейкової опори у вертикальній або горизонтальній площині;

$sign\dot{\delta}_{дин_i}$ - знак швидкості деформації і-й опори при русі j-го колеса.

Відмінності в пружно-динамічній характеристиці рейкових опор (їх просторові жорсткості і коефіцієнти демпфування), що включаються в розрахункову схему в будь-який момент часу t, вводяться з використанням методу статистичних випробувань (Монте-Карло).

В шостому розділі наведено результати аналізу впливу на колію спеціального і спеціалізованого рухомого складу на основі чисельних досліджень.

Реалізація математичної моделі просторової динамічної системи "екіпаж-колія" виконана з використанням програмної системи Mathcad Professional. Побудова програми, черговість виконуваних розрахунків, обмін інформацією і отримання результатів у вигляді сил взаємодії підсистем "екіпаж" і "колія" наведено на рис. 17.

Структурно програма складається з п'ятнадцяти блоків. Нелінійна постановка ряду завдань (нелінійність просторових опор, сил тертя, виникнення напрямних сил та інші), а також змінність характеристик колії при русі екіпажу зажадали розробки в свою чергу внутрішніх структур блоків з використанням елементів логіки. Рішення основної системи диференціальних рівнянь коливань екіпажу виконуються інтегруванням за методом Рунге-Кнута з фіксованим кроком. Для цього система рівнянь була приведена до нормальної форми Коші: $\dot{y}(t)=F(t,y)$

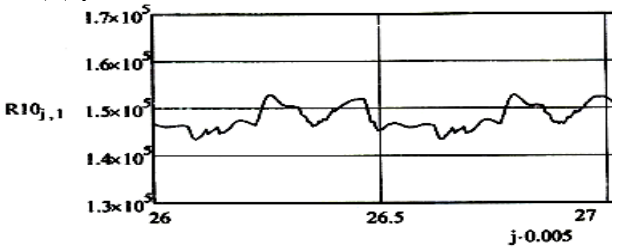
Вбудовані функції системи Mathcad дозволяють ілюструвати отримані результати у вигляді графіків змін сил взаємодії колії та екіпажу при його русі по ділянці колії. Досвід роботи з програмою показав, що тривалість розрахунків руху екіпажу по ділянці довжиною

100-150м, що складається з прямої ділянки, перехідної і кругової кривої з нерівностями плану і профілю, які можуть задаватися в будь-якій точці колії, становить від 20 до 35 хвилин. Для виявлення особливостей впливу на колії спеціальних і спеціалізованих вагонів промислового транспорту - чавуновозів, шлаковозів, чавуновозних візків, візків для виливниць і думпкарів, були виконані багатоваріантні розрахунки. Розрахунки показали, що використання загальної схеми колії як балки на пружно-дисипативних опорах з постійними просторовими характеристиками жорсткості і дисипації викликає, при русі по прямій рівній ділянці колії зі швидкістю 5-10 км / год, появу вертикальних динамічних сил, коефіцієнт динамічності яких може досягати у деяких видів вагонів значень 1,115-1,147. Вид шпал робить істотний вплив на процеси динаміки рухомого складу (рис. 18). Ударні динамічні навантаження при проходженні колесами рейкових стиків перевищують значення 65 кН при дерев'яних та кН при залізобетоних шпалах для деяких типів спеціального рухомого складу.

Введення в розрахунки статистичними способами нерівнопружності рейкових опор суттєво збільшує значення динамічних сил (рис. 19).

При реалізованих на коліях промислового транспорту швидкостях руху екіпажу суттєвий вплив на величину вертикальних динамічних сил надають короткі (до 6 м) нерівності профілю. У поєднанні з нерівножорсткістю рейкових опор такі нерівності викликають, при деяких типах рухомого складу, вертикальні динамічні сили, коефіцієнт динамічності яких може досягати значень 1,20-1,23. Абсолютні значення колісного навантаження на рейки можуть перевищувати 300 кН.

Дерев'яні шпали:



Залізобетонні шпали:

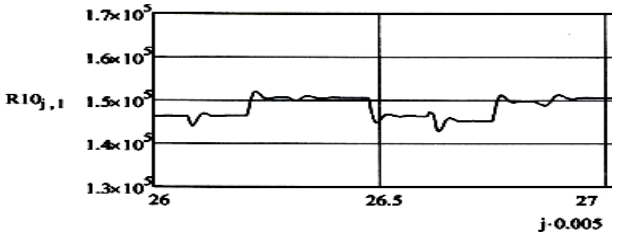


Рис. 18 - Графіки вертикальних динамічних сил при русі думпкара ВС-85 зі швидкістю 10 км / год.

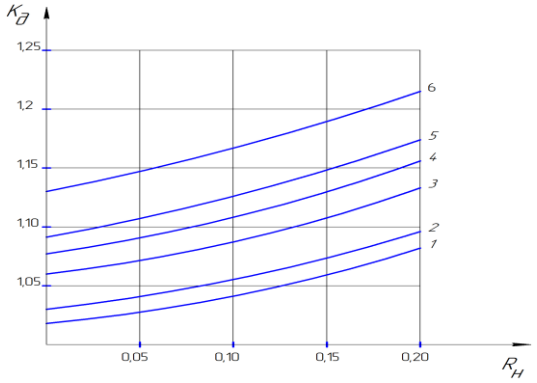


Рис 19 Графіки залежностей коефіцієнтів динамічності екіпажів від коефіцієнта нерівнопружності рейкових опор, залізобетонні шпали, швидкість руху 10 км / год:

1 - напіввагон моделі 12-1000;
2 - думпкар 6 ВС-60;
3 - думпкар ВС-85;
4 - платформа чавуновозна 70 т;
5 - чавуновоз 140 т;
6 - візок для виливниць И-120-5500

Розрахунки показали, що на величини горизонтальних поперечних сил, що діють на колію, впливають як характеристики рухомого складу і його швидкість, так і характеристики колії, у тому числі умови плану лінії, вид шпал, термін служби колії. Як правило, при справній колії значення горизонтальних поперечних сил в кривих з радіусами 150-300 м не перевищують значень 35-65 кН при фактично реалізованих швидкостях руху.

Однак горизонтальні геометричні нерівності колії викликають виникнення горизонтальних поперечних сил, величина яких може бути значною. Навіть у прямих ділянках колії ці нерівності викликають поперечні сили, які складають 80 кН для деяких типів вагонів при швидкості руху 10 км / год (рис. 20).

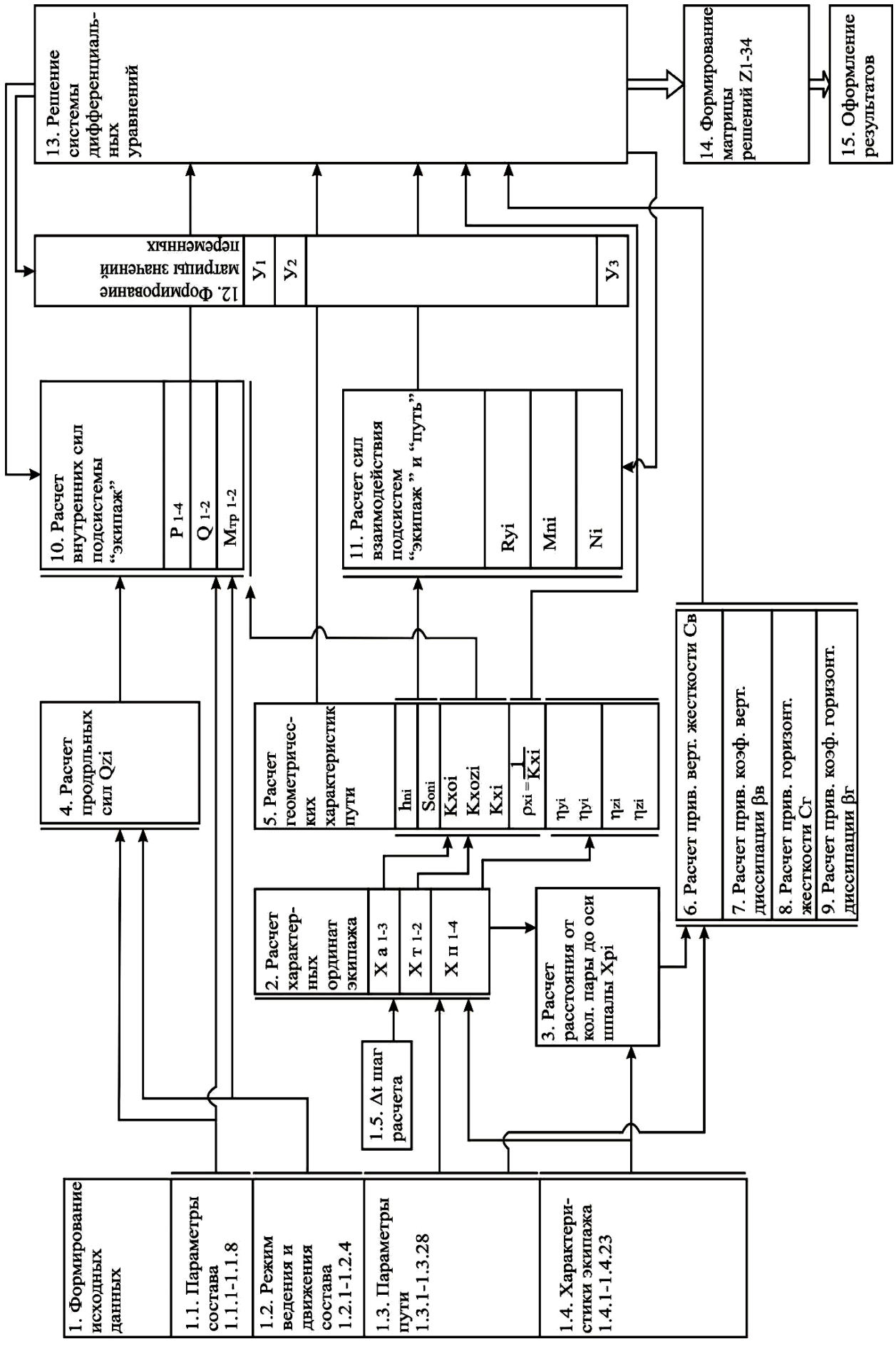


Рис.17 Алгоритм розрахунків сил взаємодії екіпажу і колії

Особливо несприятлива дія екіпажу на колію в кривих малих радіусів. Так, на рис. 22 наведені результати розрахунків поперечних сил в кривих з радіусами від 150 до 350 м, що мають горизонтальні нерівності довжиною 2 і 4 м і амплітудою від 10 до 40 мм, колію на дерев'яних шпалах. При зміні швидкості руху чавуновозів вантажопідйомністю 140 т від 2,5 до 10 км / год величина поперечних сил зросла від 21-40 кН до 62-106 кН.

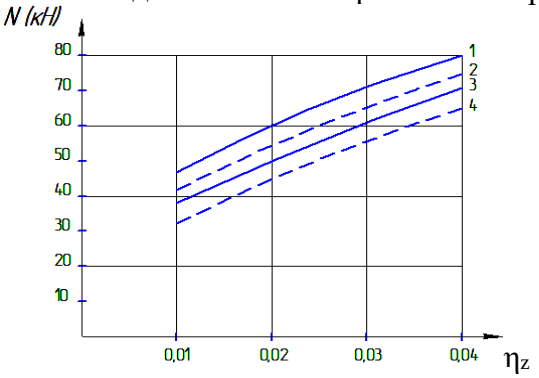


Рис. 20 Графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від амплітуди горизонтальної нерівності при русі чавуновозів вантажопідйомністю140 т зі швидкістю 10 км / год:

1 - довжина нерівності 2 м, залізобетонні шпали;

2 - довжина нерівності 2 м, дерев'яні шпали,

3 - довжина нерівності 4 м, залізобетонні шпали;

4 - довжина нерівності 4 м, дерев'яні шпали.

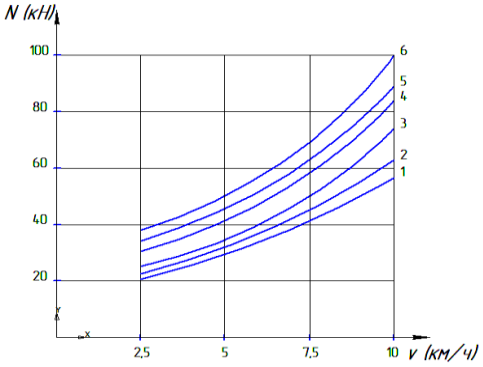


Рис. 21 - Графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від швидкості руху чавуновозів вантажопідйомністю 140 т по кривих з нерівностями:

1 – R=350 $L_н$=2 м η_z=0,01 м;
2 – R=250 $L_н$=2 м η_z=0,01 м;
3 – R=150 $L_н$=2 м η_z=0,01 м;
4 – R=350 $L_н$=4 м η_z=0,04 м;
5 – R=250 $L_н$=4м η_z=0,04 м;
6 – R=150 $L_н$=4 м η_z=0,04 м.

У сьомому розділі наведені деякі результати розрахунків напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії, які були отримані з застосуванням розробленої просторової моделі методом кінцевих елементів (МКЕ). Для комп'ютерної реалізації моделі колії МКЕ в дисертації використаний програмний комплекс "Ліра", версія 9.6.

В основу моделювання був прийнятий модульний принцип, при якому модуль складається з двох відрізків рейок, довжина яких може бути прийнята рівною 1300, 1100 або 1000 мм (для решітки з епюрою шпал 1600, 1840 або 2000 шт / км), двох залізобетонних шпал, до яких рейки прикріплюються скріпленням типу КБ і відрізка баластної призми (рис.22). Загальна модель колії може складатися з одного, двох, трьох і більше модулів в залежності від характеру поставленого завдання (рис.23), необхідної точності розрахунків і прийнятною їх тривалістю. Так наприклад, для розрахунків локального впливу на колію однієї колісної пари з метою визначення контактних напруг і напруг у рейках, елементах проміжних скріплень, в шпалах, баласті досить використовувати один модуль. Для оцінки об'ємного напружено-деформованого стану елементів колії під дією візка екіпажу потрібно вводити в розрахунки три модулі і т.д. Модулі з'єднуються між собою і з прилеглими ділянками колії за допомогою граничних умов кожного модуля - згинальних моментів і поперечних сил у рейках, напруг і деформацій у баласті.

Загальні принципи побудови моделі колії на базі МКЕ повністю узгоджується з прийнятою в роботі загальною розрахунковою схемою у вигляді балок на багатьох пружно-дисипативних опорах-шпалах. Об'єднання програми

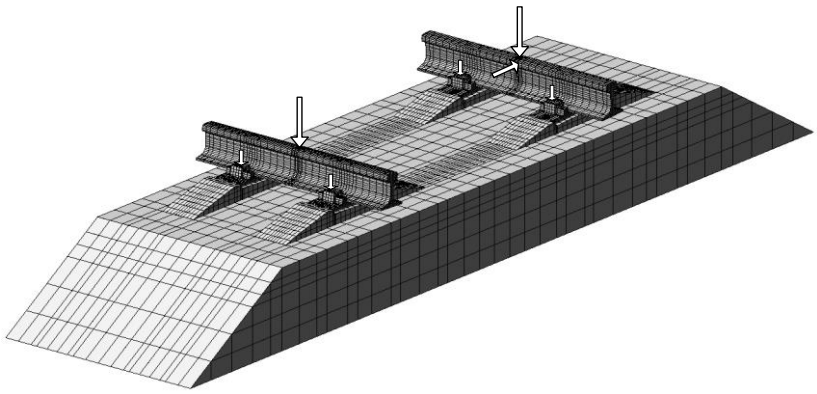


Рис. 22 - Розрахункова схема одного модуля при розрахунку ділянки колії.

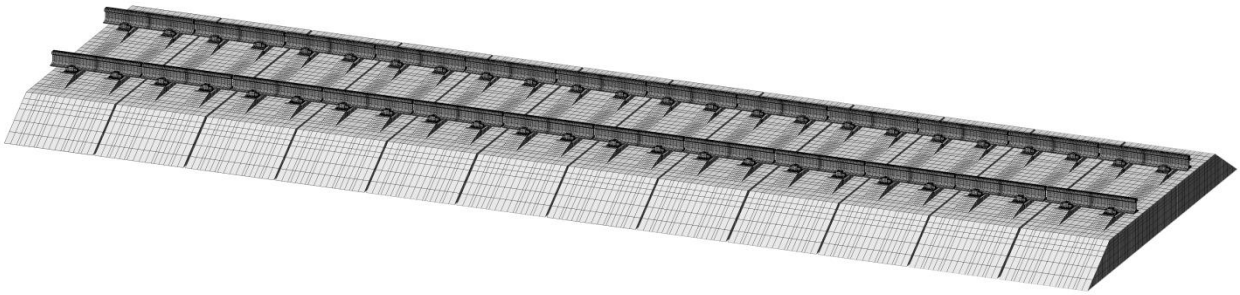


Рис. 23 Розрахункова схема колії довжиною 13,2 м, що складається з 12 модулів.

розрахунку динамічної системи "екіпаж-колія" (розділ 6) і програми розрахунку ділянки колії МКЕ дозволяє визначати напружено-деформований стан елементів верхньої будови колії практично в будь-яких умовах промислових залізниць.

Моделювання рейок виконано з використанням кінцевих елементів (КЕ), призначених для розрахунків напружено-деформованого стану континуальних об'єктів з однорідного ізотропного лінійно-пружного матеріалу в постановці тривимірної задачі теорії пружності. Передача навантажень від коліс виконується через межі КЕ, розташованих на поверхні кочення на бічних робочих гранях головки рейки. Площі майданчиків контакту встановлюються в залежності від зносу рейок і коліс.

При моделюванні елементів проміжних скріплень типу КБ (підкладок, клем, нашпальних і підрейкових прокладок) враховані умови їх взаємного контактування, сили тертя,які виникають, наявність зазорів між підошвою рейки і ребордами підкладок. Модулі пружності прокладок прийняті на підставі результатів досліджень, викладених у розділі 2.

У об'ємну модель шпали типу Ш-1 введені КЕ, що моделюють роботу арматури, в тому числі зусилля попереднього натягу.

У моделі модуля баласту використані КЕ, що враховують роботу сипкого матеріалу на стиск з урахуванням зсуву, контактування і тертя баласту зі шпалою, контактування баласту з основним майданчиком земляного полотна.

У розділі наведено аналіз деяких результатів розрахунків напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії в умовах експлуатації промислових залізниць з застосуванням розроблених программ розрахунків. Досвід розрахунків показав, що розроблені моделі і методи можуть бути досить ефективними при дослідженнях. Наочне представлення результатів у вигляді діаграм ізополей деформацій і еквівалентних напружень в елементах колії легко дозволяє встановлювати зміни їх стану, визначати місця концентрації напружень в залежності від швидкостей руху екіпажів, при змінах параметрів рейкової колії, при розвитку геометричних нерівностей. Так, на рис. 24 наведені діаграми ізополей еквівалентних стискаючих напружень в рейках і залізобетонних шпалах, що виникають при русі чавуновозів вантажопідйомністю 140т зі швидкістю 2.78 м / с в прямих і кругових кривих радіусом 350м.

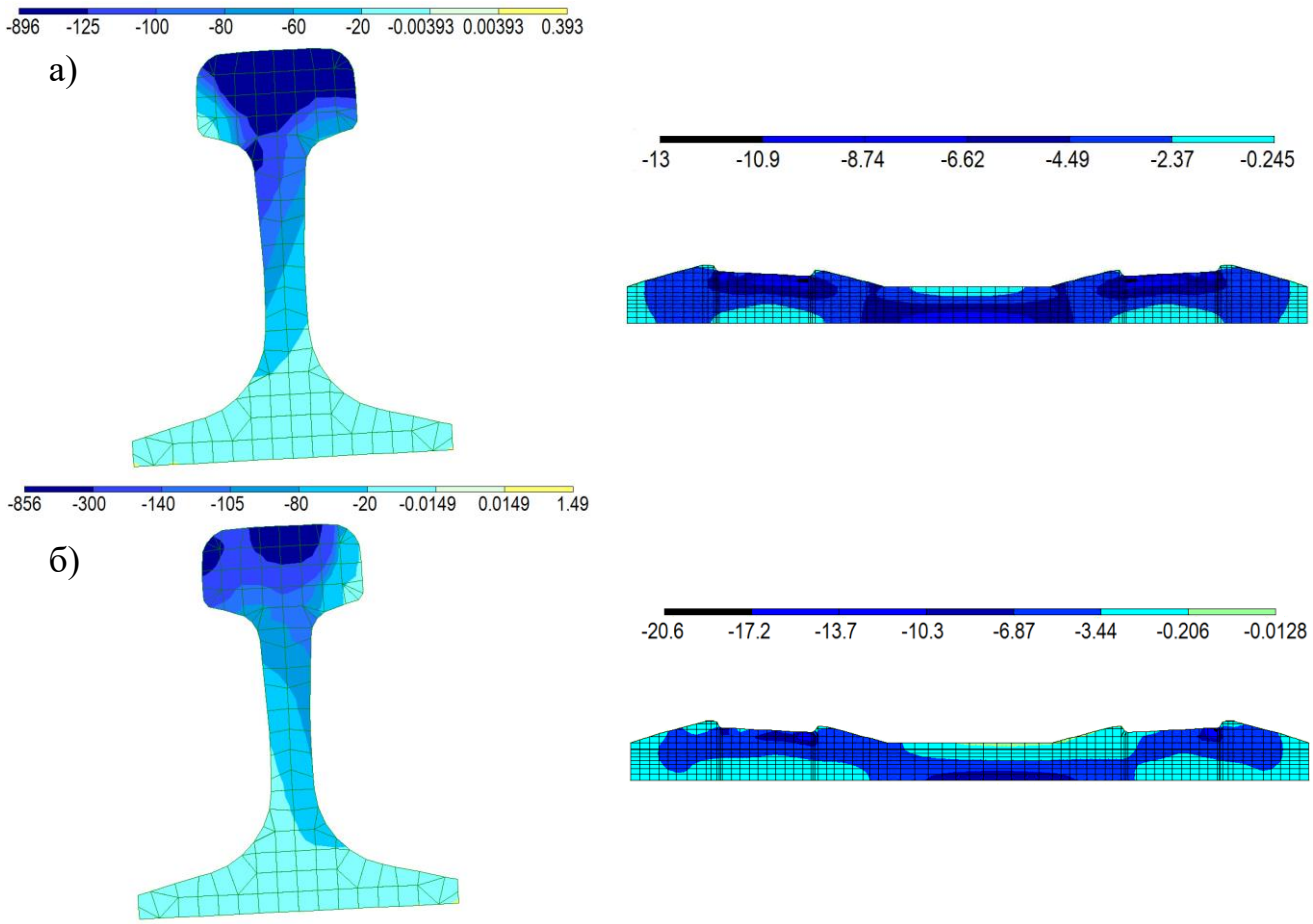


Рис. 24 - Ізополя еквівалентних стискаючих напружень:
а – пряма ділянка;
б – кругова крива.

Розрахунками встановлено, що при русі екіпажів з осьовими навантаженнями більше 350 кН по кривих ділянках колії з радіусами 350 м і менше, в деяких умовах згинні напруги в рейках перевищують допустимі за умовами втомної міцності напруги для рейок зі звичайною термообробкою і близькі до допустимих для термозміцнених рейок.

Залізобетонні шпали типу Ш-1 цілком працездатні при роботі на ділянках колії, по яких прямує рухомий склад з осьовими навантаженнями до 500кН при обмеженні швидкостей руху до 7-10 км / год. Для ділянок колії з рухом екіпажів з осьовими навантаженнями понад 300 кН потрібне посилення баластної призми.

У восьмому розділі виконаний аналіз експериментальних досліджень роботи колії в умовах промислового транспорту.

В якості головних цілей експериментальних робіт, крім перевірки результатів теоретичних розрахунків сил, що діють на колію та розрахунків напружено-деформованого стану елементів колії, було одержання інформації для визначення пружно-динамічних характеристик рейкових опор (розділи 2 і 3). Тому при проведенні експериментальних досліджень визначалися як діючі напруги в кромках головки і підошви рейок і сили, які передаються рейками на шпали, так і просторові переміщення рейок і шпал при русі потягів в різних умовах експлуатації. Виміри силових параметрів були виконані електротензометричними методами з застосуванням мікропроцесорних аналого-цифрових перетворювачів і ноутбука для їх реєстрації у функції реального часу, зберігання і подальшої обробки інформації.

З метою виключення впливу деформацій і вібрацій баласту і земляного полотна на зміни переміщень елементів колії, була розроблена відеоцифрова система, основний принцип роботи якої полягав у наступному. На елемент колії, переміщення якого потрібно виміряти, наклеюється мішень у вигляді чорного кола на білому фоні, діаметр цього кола суворо фіксований (рис. 25). Переміщення мішені при русі екіпажу записуються цифровою

відеокамерою з 60-кратним оптичним збільшенням. Відеокамера встановлюється на віброзахищену стабілізовану платформу, розташовану в 6-8м від колії. Вертикальні і горизонтальні поздовжні переміщення елемента колії визначаються комп'ютером на підставі аналізу відеоінформації про переміщення мішені, яка надходить в цифровому вигляді, за допомогою спеціальної програми у функції реального часу з точністю 10^{-3}с.

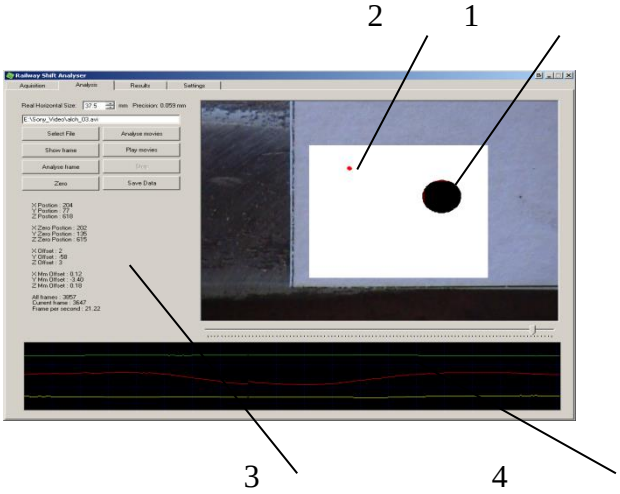


Рис. 25 - Зображення вимірювань переміщень кромки головки рейки на дисплеї комп'ютера

1 - мішень
2 - лазерний промінь
3 - поточні значення переміщень
4 - графіки переміщень у функції часу

Для вимірювань горизонтальних поперечних переміщень на платформі на відстані 1м від оптичної осі відеокамери закріплюється лазер з сферичним випромінювачем і каліброваною діафрагмою. Відеоінформація про взаємні переміщення променя лазера і мішені дозволяє розраховувати поперечні переміщення елемента колії (рис. 26). Використання каліброваної мішені виключає необхідність точного встановлення платформи, оскільки всі переміщення визначаються спочатку в частках від діаметра кола мішені.

Реєстрація результатів вимірювань силових параметрів і переміщень одним комп'ютером в функції часу дозволило точно поєднувати ці масиви даних, що необхідно, наприклад, при визначенні дисипативних характеристик рейкових опор.

Експериментальні роботи були виконані на 21 дослідній ділянці колії металургійних і гірничодобувних підприємств, які різнилися як характеристиками і конструкціями колії, так і типами рухомого складу, що

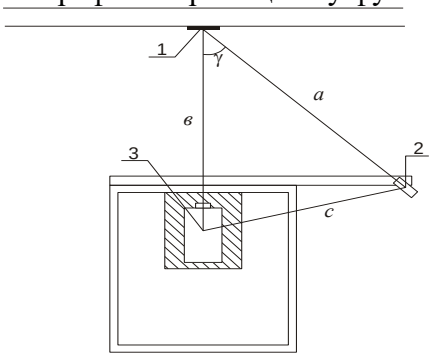
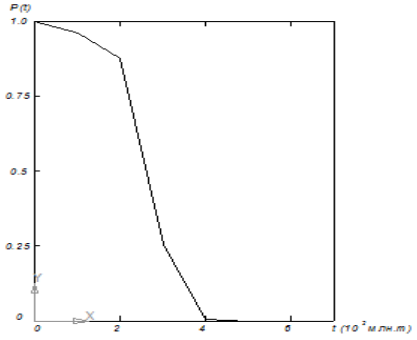


Рис. 26 - Розрахункова схема для визначення кута падіння лазерного променя.

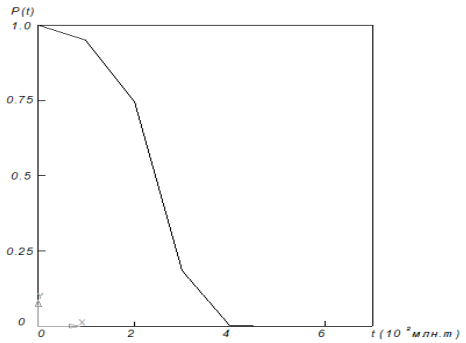
обертався. Проведення робіт, у тому числі в зимових умовах, дозволило визначити їх вплив на параметри жорсткості і дисипації рейкових опор.

Дані експериментальних робіт добре узгоджуються з розрахунковими значеннями напруг в рейках та їх деформацій. Відмінності не перевищують, як правило, 3,5-6,5%. Порівняльні розрахунки напруг у рейках, які виконані за методом пружної основи, показали, що цей метод, для умов промислових залізниць, дає занижені результати.

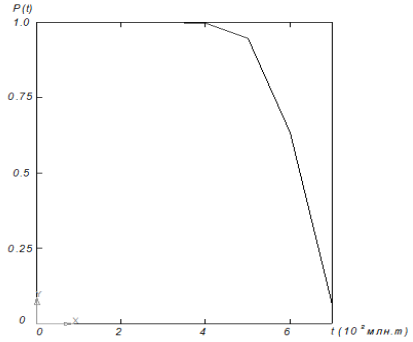
а)



б)



в)



г)

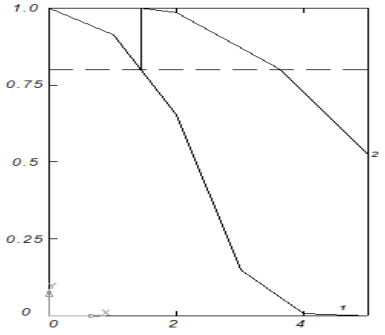


Рис. 27 – Функції надійності роботи системи екіпаж-колія при русі чавуновозів вантажопідйомністю 140т:

а) за критерієм стійкості решітки;

б) за критерієм стійкості екіпажу;

в) за критерієм міцності рейок

г) 1-загальна ймовірність безвідмовної роботи;

2-після введення обмеження швидкості руху

На підставі виконаних досліджень визначені, за допомогою методів теорії надійності, критичні стани колії, при яких можлива втрата стійкості рухомого складу або рейкошпальної решітки, руйнування елементів колії, насамперед рейок. Розрахунки вірогідностей безвідмовної роботи системи “екіпаж-колія” (рис. 27) дозволили встановити припустимі швидкості руху спеціального та спеціалізованного рухомого складу по колії, яка має несправності у вигляді вертикальних або горизонтальних нерівностей колії та їх поєднання.

Висновки

У дисертації сформульовано і вирішено важливу науково-прикладну проблему підвищення ресурсів роботи промислового транспорту на основі прогнозування стану системи «екіпаж – рейкова колія» шляхом вдосконалення методів визначення сил впливу на колію рухомого складу і розвитку методів дослідження напружено-деформованого стану колії за рахунок використання концепції дискретної рейкової основи з нелінійними пружно-дисипативними характеристиками. На підставі проведених досліджень зроблені такі висновки:

1. Аналіз розвитку теорії взаємодії колії та рухомого складу, визначення напружено-деформованого стану елементів колії показав, що найбільш вживаною в даний час є модель колії у вигляді балок на суцільній пружній основі з постійними пружно-динамічними характеристиками. Для умов промислового транспорту така модель надмірно ідеалізує колію і її технічний стан.

2. Розроблено концепцію визначення динамічних просторових сил взаємодії рухомого складу промислового транспорту та колії при підрейковій основі у вигляді дискретних пружно-дисипативних опор-шпал з нелінійними характеристиками.

3. Сформовано наукові підходи до визначення просторових пружно-динамічних характеристик дискретних рейкових опор з урахуванням умов і термінів їх експлуатації, рівня діючих сил. На відміну від виконуваних раніше досліджень, встановлено, що в умовах промислового транспорту, залежно від рівня навантаження, характерного для рухомого складу промислового транспорту, має місце зростання жорсткостей рейкових опор (вертикальної, горизонтальної поперечної та при крученні рейки) до 79%. Додатково в процесі експлуатації колії відбувається збільшення цих параметрів опор на 63-108%.

4. Розроблено метод визначення непружних опорів рейкових опор просторовим деформаціям за допомогою еквівалентних коефіцієнтів дисипації, що враховують роботу всіх видів сил внутрішнього тертя конструкції. Вперше встановлено, що в умовах промислового транспорту залежно від рівня навантаження і термінів експлуатації колії, параметри дисипації можуть змінюватися більш ніж в 3,5 рази.

5. Встановлено закономірності формування та розвитку нерівностей профілю і плану колій промислового транспорту, які є одним з джерел вимушених коливань рухомого складу. Отримано співвідношення впливу експлуатаційних і конструктивних характеристик колій промислового транспорту на процеси розвитку нерівностей.

6. Обґрунтовано та розроблено комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж - колія» на основі уявлень про дискретну підрейкову основу з нелінійними пружно-динамічними характеристиками, що мають статистичний характер. Отримали подальший розвиток методи розрахунку рейок на згин і кручення як балок на дискретних опорах з нелінійними характеристиками під дією рухомого динамічного навантаження.

7. Дослідженнями встановлено, що використання уявлень про дискретну підрейкову основу дозволяє враховувати появу додаткових динамічних сил, коефіцієнт динамічності яких може скласти для деяких типів вагонів значення 1,12-1,15 при швидкостях руху до 10 км / год. Вертикальні нерівності колії в поєднанні з нерівножорсткістю рейкових опор викликають збільшення коефіцієнтів динамічності до значень 1,20-1,23. Абсолютні значення вертикального колісного навантаження на рейки можуть перевищувати 300 кН. При русі спеціальних вагонів промислового транспорту по кривих з радіусами 150-350 м значення горизонтальних поперечних сил досягають рівня 85-106 кН. Значення сил дії спеціального та спеціалізованого рухомого складу на колію, отримані з використанням розробленого комплексу математичних моделей динамічної системи «екіпаж- колія», використані для дослідження об'ємного напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії.

8. Для визначення напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії обгрунтований і розроблений комплекс наскрізних функціональних моделей рейок, елементів скріплень, шпал і баласту на основі використання методу кінцевих елементів. Розроблено метод синтезу моделей елементів колії МКЕ на основі формування модульної концепції моделювання. На відміну від існуючих методів моделювання елементів колії, модульна концепція дозволяє вирішувати проблему обумовленості матриці жорсткості елементів з різними жорсткістними параметрами, вирішувати проблему збіжності ітераційного методу розрахунку, скорочувати час розрахунку в 3,5-4 рази.

9. Виконана порівняльна оцінка точності відомих і запропонованих методів досліджень напруженого-деформованого стану колії промислового транспорту на основі даних експериментальних робіт, проведених на ряді металургійних і гірничодобувних підприємств. Аналіз даних експериментів та розрахунків з використанням запропонованих моделей і методів показав їх добру збіжність; відмінності знаходяться, як правило, в межах 6,5%.

10. Обґрунтовано та сформовано наукові підходи до визначення критичних станів колії, при яких можлива відмова системи «екіпаж – рейкова колія» в умовах експлуатації промислового транспорту. Встановлені допустимі швидкості руху спеціального та спеціалізованого рухомого складу по колії, яка знаходиться в критичному стані. Обмеження швидкості руху дозволяє продовжити безпечну експлуатацію колії протягом 2 – 3 місяців, що дозволяє виконати необхідні попереджувальні, або ремонтні роботи.

11. Впровадження рекомендацій, які запропоновані на підставі досліджень дисертаційної роботи, можуть давати економічний ефект в розмірі до 10,6 тис. грн./км в рік.

Розроблені моделі і методи, процедури розрахунків дозволяють уточнювати і одержувати більш достовірні результати, в порівнянні з використовуваними раніше заниженими даними методу пружної основи, для рекомендацій про сфери застосування існуючих конструкцій та елементів колії, проектування спеціальних конструкцій для промислового транспорту.

Список опублікованих робіт по темі дисертації

1. Даренський О.М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту: монографія [Текст] / О.М. Даренський, - Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 204 с.

2. Даренський О.М. Оцінення впливу на колію подовжних сил, які виникають в поїзді в умовах промислового транспорту [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2006.- № 72. -С. 119-124.

3. Даренский А.Н. Оценка надежности работы промежуточных скреплений типа КБ в условиях железных дорог металлургических предприятий [Текст] / А.Н. Даренский // ІКСЗТ. - 2006. № 4 (додаток) -С. 23-25.

4. Даренський О.М. Математична модель просторової жорсткості скріплення типу КБ [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2007.- № 80. – С166-176.

5. Даренський О.М. Експериментальне визначення пружних характеристик прокладок проміжних скріплень КБ [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2007.- № 87. -С. 172-178.

6. Даренський О.М. Просторова жорсткість проміжного скріплення типу КПП - 5 [Текст] / О.М. Даренський // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2007.- № 10. -С. 100-109.

7. Даренский А.Н. Статические характеристики случайных вертикальных неровностей пути в условиях промышленного транспорта [Текст] / А.Н. Даренский // ІКСЗТ. – 2007.- № 3. -С. 2-4.

8. Даренский А.Н. Оценка влияния кривых на статистические характеристики горизонтальных неровностей пути в условиях промышленного транспорта [Текст] / А.Н. Даренский // ІКСЗТ. – 2007.- № 4. -С. 2-4.

9. Даренський О.М. Експериментальне визначення пружних характеристик елементів проміжного скріплення КПП -5 [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2008.- № 13. -С. 139-143.

10. Даренський О.М. Визначення сил опору поперечному переміщенню залізобетонних шпал у баласті [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг, А.М. Штомпель, Н.В. Бугаєць // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2008.- № 91. -С. 89-96.

11. Даренский А.Н. Статистические характеристики силовых неровностей продольного профиля пути на участках обращения подвижного состава с осевими загрузками до 30т. [Текст] / А.Н. Даренский // ІКСЗТ. – 2008.- № 2. -С. 17-20.

12. Даренский А.Н. Сопротивление промежуточных скреплений КБ и КПП – 5 перемещениям рельсов в продольной плоскости [Текст] / А.Н. Даренский, В.Г. Витольберг // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2008.- № 14. -С. 142-152.

13. Даренский А.Н. Влияние осевих нагрузок на статистические характеристики геометрических неровностей плана и профиля пути промышленного транспорта [Текст] / А.Н. Даренский // ІКСЗТ. – 2008.- № 3. -С. 43-47.

14. Даренский А.Н. Влияние геометрических неровностей пути на величины изгибных напряжений в рельсах [Текст] / А.Н. Даренский // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2008.- № 99. -С. 167-176.

15. Даренский А.Н. Экспериментальное определение сопротивлений скреплений КБ и КПП – 5 перемещениям рельсов в продольной плоскости [Текст] / А.Н. Даренский, В.Г. Витольберг // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2008.- № 15. -С. 112-124.

16. Даренский А.Н. Метод оценки надежности противоугонных систем [Текст] / А.Н. Даренский, В.Г. Витольберг // Державний економіко – технологічний університет транспорту. – 2009.- № 14. -С. 35-40.

17. Даренский А.Н. Результаты экспериментальных работ по определению сил сопротивления железобетонных шпал продольным перемещениям [Текст] / А.Н. Даренский, В.Г. Витольберг, Н.В. Бугаец // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2009.- № 17. -С. 157-171.

18. Даренский А.Н. Видеоцифровая система измерения перемещений элементов железнодорожного пути [Текст] / А.Н. Даренский, В.Г. Витольберг, Н.В. Бугаец // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2009.- № 109. -С. 222-231.

19. Даренський О.М. Зміни деяких параметрів жорсткості рейкових скріплень типу КБ при їх експлуатації [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2009.- № 111. -С. 282-294.

20. Даренський О.М. Методологічні основи вибору розрахункової схеми динамічної системи "екіпаж - колія" для умов промислового транспорту [Текст] / О.М. Даренський // ІКСЗТ. – 2010.- № 2. -С. 32-36.

21. Даренський О.М. Розрахункова схема динамічної системи "екіпаж - колія" для умов промислового залізничного транспорту. Загальні положення і допущення математичної моделі системи [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2010.- № 21. -С. 219-230.

22. Даренський О.М. Визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки при використанні розрахункової схеми як балки на пружних опорах з випадковими характеристиками [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць, В.Г. Вітольберг // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2010.- № 115. -С. 151-162.

23. Даренський О.М. Умови контактування коліс і рейок в горизонтальній площині. Силові і кінематичні зв'язки екіпажу і колії [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2010.- № 113. -С. 171-177.

24. Даренський О.М. Теоретичні основи визначення параметрів непружніх опорів колії [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2010. № 118 -С. 187-194.

25. Даренский А.Н. Расчет рельса на кручение под действием горизонтальных поперечных сил как балки на упругих опорах [Текст] / А.Н. Даренский // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2010.- № 23. -С. 188-205.

26. Даренский А.Н. Результаты определения пространственных неупругих сопротивлений железнодорожного пути деформациям для условий промышленного транспорта [Текст] / А. Н. Даренский // ІКСЗТ. – 2010.- № 6. -С. 78-82.

27. Даренский А.Н. Результаты исследований численными методами вертикальных воздействий на путь специальных и специализированных вагонов промышленного транспорта [Текст] / А. Н. Даренский // ДонНИИЖТ Збірник наукових праць. – 2010.- № 24. -С.168-179.

28. Даренский А.Н. Особенности взаимодействия пути и подвижного состава промышленного транспорта в кривых малого радиуса [Текст] / А. Н. Даренский // ІКСЗТ – 2011.-№1.-С.25-30.

29. Даренський О.М. Моделювання елементів верхньої будови колії методом кінцевих елементів [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаець, Л.Г.Волчок // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2011.-№122.-С.68-79.

30. Даренский А.Н. Результаты экспериментальных исследований работы железнодорожного пути промышленного транспорта [Текст] / А. Н. Даренський // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2011.-№125.-С.39-45.

31. Даренський О.М. Робота проміжних скріплень КБ в умовах колій металургійних підприємств [Текст] / О.М. Даренський, О.І. Єфимов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2011.-№126.-С.228-234.

32. Даренський О.М. Експериментальне визначення коефіцієнтів постілі шпал в умовах промислового залізничного транспорту [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаець // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2011.-№127.-С. 193-199

33. Пат. № 70477 Україна, МПК11 G 01 D 5/00; У01 И 35/00. «Система для вимірювання переміщень в елементах інженерних конструкцій і споруд під дією навантажень» / Даренський О.М., Астахов В.М., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В., Беліков Є.А.; заявник і патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. - № u 2011 14788; заявл. 13.12.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл.№11/2012. – с.5: ил. 3.

34. Даренський О.М. Розрахунок рейки як балки на пружних опорах під дією рухомого навантаження [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць, В.Г. Вітольберг // ДІІТ, тези доповідей. – 2010.- № .14.. -С.171.

Додаткові праці

35. Даренський О.М. Лінійні конструкції верхньої будови колії: Навчальний посібник. Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (№ 1.4/18-7-77 від 19.05.2006) [Текст] / О.М. Даренський, О.О. Скорик – Харків: УкрДАЗТ, 2006 – 112 с.

36. Даренський О.М. З'єднання та схрещення залізничних колій: Навчальний посібник Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник. для студентів вищих навчальних закладів (№ 1.4/18-Г-738 від 15.05.2007) / О.М. Даренський – Харків: УкрДАЗТ, 2007 – 82 с.

37. Даренський О.М. Експлуатація залізничних колій: Навчальний посібник. Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом «Залізничний транспорт» (№ 1/11-1146 від 23 лютого 2010 року) [Текст] / О.М. Даренський, В.Г Вітольберг, Н.В. Бугаєць, Д.О. Потапов, О.С. Саяпін, Г.М. Талавіра – Харків: УкрДАЗТ, 2010 – 164 с.

38. Даренський О.М. Параметри надійності роботи залізобетонних шпал на коліях металургійних підприємств України [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2006.-№72.-С.115-119.

39. Даренский А.Н Особенности воздействия на путь чугуновозов грузоподъемностью 140т. [Текст] / А.Н. Даренский, А.В. Клименко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2011.-№125.-С.46-52.

Анотація

Даренський О.М. Наукові основи підвищення ресурсів роботи промислового транспорту на основі прогнозування стану системи «екіпаж - рейкова колія». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.12 – промисловий транспорт. Українська державна академія залізничного транспорту. – Харків, 2011.

Робота присвячена створенню наукових основ підвищення ресурсів роботи промислового транспорту шляхом розвитку і вдосконалення моделей і методів визначення дії на колію рухомого складу та мтодів дослідження напружено-деформованого стану колії.

Розроблено методики визначення пружних і дисипативних характеристик рейкових опор, встановлено залежності змін цих характеристик в процесі експлуатації колії з урахуванням особливостей роботи в умовах промислового транспорту. Отримано залежності розвитку геометричних нерівностей колії.

Розроблена математична модель динамічної системи "екіпаж - колія", алгоритми і програма розрахунків просторових сил впливу спеціального і спеціалізованого рухомого складу промислового транспорту на колію. Виконано моделювання елементів верхньої будови колії методом скінчених елементів. Виконаний аналіз напружено – деформованого стану елементів колії в різних експлуатаційних умовах промислового транспорту.

Проведені експериментальні дослідження, які підтвердили достовірність теоретичних розрахунків.

Визначені стани колії, при яких можливі відмови роботи системи «екіпаж – рейкова колія», надані рекомендації щодо умов експлуатації колії в таких станах.

Ключові слова: ресурси роботи промислового транспорту, взаємодія колії та рухомого складу, верхня будова колії промислових залізниць, балки на багатьох пружньо–дисипативних опорах, жорсткість та дисипація рейкових опор.

Аннотация

Даренский А.Н. Научные основы повышения ресурсов работы промышленного транспорта на основе прогнозирования состояния системы «экипаж – рельсовый путь». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.12 – промышленный транспорт. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта. – Харьков, 2011.

Работа посвящена созданию научных основ повышения ресурсов работы промышленного транспорта путем развития и совершенствования моделей и методов определения воздействия на путь подвижного состава и методов исследований напряженно-деформированного состояния пути.

Выполнен анализ работы рельсовых опор под действием вертикальных, горизонтальных продольных и поперечных сил, определен перечень параметров, формирующих пространственные жесткости опор. Экспериментальными исследованиями в лабораторных и полевых условиях определены пространственные жесткости промежуточных скреплений и шпал, определено влияние осевых нагрузок, конструктивных особенностей пути на эти параметры. Установлены зависимости изменений пространственной жесткости рельсовых опор в процессе эксплуатации для различных категорий промышленных железных дорог.

Разработан метод определения неупругих сопротивлений рельсовых опор пространственным нагрузкам с помощью эквивалентных коэффициентов диссипации, учитывающих все виды трения, возникающие в пути. Разработана методика определения эквивалентных коэффициентов диссипации по данным экспериментальных работ с использованием программной системы “Mathcad”. Установлены зависимости изменений неупругих сопротивлений опор в процессе эксплуатации пути.

Исследованы закономерности развития геометрических неровностей путей промышленного транспорта в процессе эксплуатации. Установлено влияние конструктивных и технических характеристик пути и подвижного состава. Выполнен анализ статистических и частотных характеристик геометрических неровностей путей.

Разработана математическая модель пространственной динамической системы «экипаж – путь». При моделировании работы пути использована расчетная схема балки на многих упруго – диссипативных опорах. Рассмотрена работа рельсов на вертикальный и горизонтальный изгиб и кручение под воздействием пространственных сил от подвижного состава. Математическая модель реализована в программной системе «Mathcad».

Численными методами выполнены исследования пространственных сил воздействия специализированного и специального подвижного состава на путь. Определено влияние технических характеристик экипажей и пути, включая параметры жесткости и диссипации рельсовых опор, на величины этих сил.

Для расчетов напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути в условиях промышленного транспорта выполнено их моделирование методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса «Лира» (версия 9,0). На основании результатов многовариантных расчетов выполнен анализ напряженно-деформированного состояния элементов пути в различных эксплуатационных условиях.

Проведены экспериментальные работы на участках путей горнодобывающих и металлургических предприятий с использованием видеоцифровой, микропроцессорной и

компьютерной техники, выполнено сравнение результатов теоретических расчетов с данными экспериментов.

Определены состояния пути при которых вожможны отказы работы системы «экипаж – рельсовый путь», даны рекомендации по условиям эксплуатации пути в таких состояниях.

Ключевые слова: ресурсы работы промышленного транспорта, взаимодействие пути и подвижного состава, верхнее строение пути промышленных железных дорог, балки на многих упруго-диссипативных опорах, жесткость и диссипация рельсовых опор.

Abstract

Darenskiy A.N. Scientific basis for enhancement of resources of industrial transport based on predicting the state of the “crew - rail track”. – Manuscript.

Thesis for a Doctor Degree in technological sciences, Speciality 05.22.12 - Industrial transport. Ukrainian State Academy of Railway Transport. – Kharkov, 2011.

This thesis dedicated to creation of the scientific principles increasing resources of industrial transport by the development and improvement of models and methods of definition rolling stock on the track and methods of research the deflected mode of track.

It has been developed method of determining elastic and dissipative characteristics of rail supports, dependences of those characteristics changing in the process of track maintenance with a glance of their working features for the industrial transport have been determined. It has been received dependences of geometrical track asperities development.

Mathematical model of dynamic system “carriage – track”, algorithms and calculation programs of space special and specialized rolling stock industrial transport forces on the track has been created. It has been implemented simulation of permanent way elements by finite element. It has been analyzed deflected mode elements of railway track in different working conditions for industrial transport.

Experimental investigations which proved validity of received results has been carried out.

Defined the condition of track, in which possible failure of the system “crew - rail track”, recommendations regarding operating conditions the track in such states.

Key words: resources of industrial transport, interaction of track and rolling stock, permanent way of industrial railway transport, beam on numeral elastic dissipative supports, inflexibility and dissipation of rail supports.

Підписано до друку …….
Формат 60х84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друкування офсетне. Умов. печ. л. 1,0.
Тираж 100 прим. Вид. № _____ . Замовлення № _____

Видавництво Східноукраїнського національного університету
91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а

Дільниця оперативної поліграфії
Східноукраїнського національного університету
91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а