

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТУ

Велінець Віталій Петрович



УДК 625.143.5

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТОРОВОЇ ЖОРСТКОСТІ І
СТІЙКОСТІ РЕЙКОВИХ НИТОК ПРИ ЇХ СТИСНУТОМУ КРУЧЕННІ В КРИВИХ

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Залізнична колія та колійне господарство» Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Даніленко Едуард Іванович, Державний економіко-технологічний університет транспорту, завідувач кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», м. Київ, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Курган Микола Борисович, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри «Проектування та будівництво доріг», м. Дніпропетровськ

кандидат технічних наук, доцент
Потапов Дмитро Олександрович, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри «Колія і колійне господарство», м. Харків

Захист відбудеться «01» грудня 2016 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.820.01 в Державному економіко-технологічному університеті транспорту за адресою: 03049, м. Київ, вул. М. Лукашевича, 19, ауд. №305а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного економіко-технологічного університету транспорту за адресою: 03049, м. Київ, вул. М. Лукашевича, 19.

Автореферат розісланий «28» жовтня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.820.01,
к.т.н., доцент



Твердомед В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вигин рейки у горизонтальній і вертикальній площинах при одночасному крученні рейки від спільної дії вертикальних і горизонтальних сил є найбільш складними видами деформації рейкової нитки, які залежать від просторової жорсткості цієї нитки і особливостей її кріплення на рейкових опорах. Вивчення горизонтального вигину і кручення рейкової нитки необхідні для вирішення великої кількості задач, пов'язаних із забезпеченням безпеки руху поїздів в прямих і, особливо, кривих ділянках колії; для розробки найбільш точних методів розрахунків рейок на міцність, для встановлення допустимих швидкостей руху поїздів в прямих і кривих; для створення загальної теорії проектування залізничної колії.

Дисертація присвячена визначенню характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих для рейок різних типів укладених на залізобетонних та дерев'яних шпалах з типовими жорсткими та сучасними пружними рейковими скріпленнями.

Актуальність теми. Актуальність теми дисертації визначається необхідністю наукового обґрунтування раціональних параметрів характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих з типовими жорсткими та сучасними пружними рейковими скріпленнями залежно від діючих на рейки вертикальних і горизонтальних сил на основі вивчення і порівняння параметрів їх пружності і поперечної стійкості колії при різних умовах експлуатації.

Аналіз багаточисленних досліджень по визначенню пружнодинамічних параметрів колії, що виконані за останні 50 років, дає дуже великий і неоднозначний спектр результатів щодо різних аналізованих конструкцій залізничної колії. Натурна жорсткість рейкових ниток відрізняється від розрахункових значень, які зазвичай приймаються для розрахунків колії на міцність і стійкість. Часткова інформація про характеристики просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток з'явилась 40-50 років тому на основі аналізу старих конструкцій верхньої будови колії і конструкцій скріплень, що застосовувались на той час, тому використання застарілих довідкових даних для сучасних конструкцій колії і рейкових скріплень не є правильним. Таким чином постає питання про некоректність використання існуючих застарілих розрахункових даних для сучасних розрахунків колії на міцність і стійкість.

Тому, дослідження із визначення точних характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих для сучасних конструкцій рейкової колії з рейками типів Р65, Р50, УІС60 з типовими жорсткими та сучасними пружними рейковими скріпленнями, залежно від спільно діючих на рейки вертикальних і горизонтальних колісних навантажень, є актуальною задачею.

Зв'язок теми з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації пов'язана з планами науково-дослідних робіт кафедри "Залізнична колія та колійне господарство" Державного економіко-технологічного університету транспорту (ДЕТУТ), які виконувались за завданнями Головного управління колійного господарства Укрзалізниці і Київського метрополітену і в яких автор дисертації брав участь як співвиконавець.

Безпосередньо автор брав участь в наступних науково-дослідних роботах: «Розробка технічних умов на експлуатацію рейок і стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену», тема № 55-П-13, 2013р.; а також автор брав участь в розробці наступних нормативно-технічних документів для залізничної галузі: «Технічні умови на експлуатацію рейок у коліях Київського метрополітену» (наказ КП Київського метрополітену №125-Н від 23.03.2015 р.); «Технічні умови на експлуатацію стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену» (наказ КП Київського метрополітену №169-Н від 29.04.2015р.), «Розширення сфер застосування проміжного пружного рейкового скріплення типу КПП-5 на ділянках колії з вантажнапруженістю до 60 млн. т км бруто/км на рік», тема №147-ГД від 25.12.2015 р.

Тема дисертації відповідає загальній галузевій програмі модернізації конструкцій і технологій колійного господарства Укрзалізниці і вдосконалення експлуатації колій Київського метрополітену.

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є вирішення наукової задачі спільного впливу горизонтальних поперечних і вертикальних сил при одночасному стиснутому крученні рейки на роботу рейкових ниток, а також визначення характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень в сучасних умовах експлуатації залізниць України.

У відповідності із зазначеною метою в дисертації поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Аналіз сучасних конструкцій рейкових скріплень і особливостей їх роботи в експлуатаційних умовах вітчизняних залізниць.
2. Аналіз попередніх досліджень просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень.
3. Експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток і модуля пружності колії.
4. Теоретичні розрахунки з визначення характеристик просторової жорсткості і модуля пружності рейкових ниток при їх вигині у вертикальній і горизонтальній площинах і одночасному стиснутому крученні під дією колісних навантажень.
5. Теоретичні розрахунки з визначення напружень і деформацій в головці і підшві рейок за новим розрахунковим методом для рейок типів Р65, УІС60, Р50 при різних конструкціях сучасних рейкових скріплень на залізобетонних і дерев'яних шпалах.

Об'єкт дослідження – просторова жорсткість і стійкість рейкових ниток при їх стиснутому крученні і вигині в горизонтальній і вертикальній площинах.

Предмет дослідження – рейкова колія на залізобетонних та дерев'яних шпалах із жорсткими та пружними конструкціями рейкових скріплень.

Методи досліджень. В роботі використано комплексний метод досліджень, який включає теоретичну та експериментальну частини. Для аналітичних розрахунків застосовувалась теорія розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість, розрахунково-теоретичний метод визначення жорсткості і пружності рейкових ниток в горизонтальній площині і при крученні для різних типів рейкових скріплень

і підрейкової основи. Експериментальні методи включають експериментальні випробування в польових умовах із визначення характеристик горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено існуючий метод експериментально-теоретичного рішення задачі з визначення характеристик горизонтального поперечного модуля пружності рейкової нитки при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил для конструкції колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах при різних конструкціях рейкових скріплень. Отримано нові дані для вказаних характеристик.

2. Удосконалено існуючий метод експериментально-теоретичного рішення задачі з визначення характеристик крутильної жорсткості і модуля пружності рейкової нитки при крученні від спільної дії вертикальних і горизонтальних сил для конструкції колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах при різних конструкціях рейкових скріплень. Отримано нові дані для вказаних характеристик.

3. Отримано нові дані розрахункових фізико-геометричних характеристик для рейок сучасного виробництва, які уточнюють існуючі розрахункові характеристики ДСТУ (Україна) і ГОСТ (Росія) і, які дозволяють виконувати розрахунки рейок на міцність з більшою точністю.

4. Вперше для залізниць України виконано теоретичні розрахунки за новим розрахунковим методом з визначення горизонтальної поперечної жорсткості і жорсткості при стиснутому крученні рейкових ниток при різних вітчизняних конструкціях рейкових скріплень і підрейкової основи. Отримано нові результати розрахункових параметрів просторової жорсткості і пружності рейкових ниток для сучасних конструкцій залізничної колії.

5. Вперше для теоретичних вітчизняних розрахунків міцності рейок виконано розрахунки напружень і деформацій в головці і підшві рейок за новим методом з урахуванням спільної дії вертикальних і горизонтальних сил і крутного моменту, отримано нові дані величин напружень і деформацій в рейках при різних типах рейкових скріплень і підрейкових опор.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Нова удосконалена методика з визначення горизонтальної поперечної і крутильної жорсткості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень дає можливість отримати більш точні вихідні параметри для перевірки несучої здатності конструкцій залізничної колії в кривих і прямих ділянках.

2. Визначені за представленою методикою характеристики просторової жорсткості і пружності рейкових ниток при їх стиснутому крученні дають можливість встановлювати найбільш раціональні умови експлуатації залізничної колії в кривих і прямих із забезпеченням безпеки руху поїздів і можуть служити основою для удосконалення практичних інженерних розрахунків колії на міцність, встановлення допустимих швидкостей руху поїздів.

3. Отримані результати розрахунків характеристик просторової жорсткості і пружності дозволяють давати практичну оцінку міцності, жорсткості, стійкості рейкових ниток і допустимої силової навантаженості при їх стиснутому крученні в кривих; на основі отриманих даних інженери проектувальники можуть більш

раціонально проектувати нові конструкції залізничної колії, вирішувати задачі оптимізації їх параметрів і конструкцій, і більш точно встановлювати допустимі швидкості руху поїздів.

4. Отримані в дисертації результати використовуються в науково-дослідних розробках і в навчальному процесі кафедри «Залізнична колія та колійне господарство» Державного економіко-технологічного університету транспорту (ДЕТУТ).

Особистий внесок здобувача. Постановку теми і задач досліджень виконано спільно з науковим керівником. Усі наукові положення, розробки і результати досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи отримані особисто автором. Наукові публікації [1, 4, 6, 7] опубліковані без співавторів. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать:

- виконання розрахунків із визначення нових фізико-геометричних характеристик рейок сучасного виробництва [2].
- виконання багатоваріантних розрахунків з визначення бокового модуля пружності при спільній дії на рейку горизонтальних і вертикальних сил [3].
- виконання експериментальних досліджень характеристик горизонтальної поперечної жорсткості і модуля пружності залізничної колії при різних конструкціях рейкових скріплень [5].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідалися на науково-практичній конференції «Шляхи та напрями структурної реформи залізничного транспорту України» Державного економіко-технологічного університету транспорту (Київ, лютий 2012 р.); на науково-практичній конференції «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» Державного економіко-технологічного університету транспорту (Київ, листопад 2012 р., грудень 2013 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, вересень 2013 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека руху і наукові засади експертних транспортних пригод та інженерних споруд» (Львів, вересень 2015 р.); на наукових семінарах кафедри «Залізнична колія та колійне господарство» Державного економіко-технологічного університету транспорту (Київ, грудень 2014 р., грудень 2015 р.).

Повністю дисертаційна робота доповідалась і обговорювалась на міжкафедральному семінарі кафедр «Залізнична колія та колійне господарство», «Будівельні конструкції і споруди» і «Теоретична та прикладна механіка» Державного економіко-технологічного університету транспорту (Київ, 27 квітня 2016 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації, результати теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано у 7 основних і 5 додаткових друкованих наукових працях, а також у 3 науково-технічних звітах з НДР кафедри «Залізнична колія та колійне господарство» ДЕТУТ. Всі 7 основних наукових праць видано у фахових виданнях України. 4 статті включені до переліку міжнародних науково-метричних баз, 3 інших статті опубліковані в збірниках наукових праць ДЕТУТ. Всі 5 додаткових праць є тезами доповідей на науково-практичних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 185 сторінок друкованого тексту, у тому числі: 33 рисунки, 17 таблиць, список літератури складає 73 найменування та 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі показано важливість наукової проблеми з визначення характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих з типовими жорсткими та сучасними пружними рейковими скріпленнями з урахуванням залежності від діючих на рейку сил, обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету і задачі досліджень, відображено наукову новизну і практичне значення роботи.

У першому розділі проведено різносторонній аналіз існуючих конструкцій рейкових скріплень і особливостей їх роботи в колії.

На залізницях країн світу застосовується декілька десятків типів скріплень, а дослідні конструкції нараховуються сотнями. Вони можуть бути поділені за рядом ознак: за способом прикріплення рейки до основи (роздільні, нероздільні та змішані); за типом прикріплювачів (костильні, шурупні, болтові, змішаного типу, безболтові); за наявністю підрейкової металевої підкладки (підкладкові, безпідкладкові); за типом опор (на дерев'яних шпалах, на залізобетонних шпалах та на інших).

Із аналізу розглянутих конструкцій рейкових скріплень можна визначити основний напрямок розвитку конструкції: переважають розробки безпідкладкових скріплень з підрейковими прокладками та пружними клемами на залізобетонних шпалах; оскільки залізобетон добре працює на стиск, від металевих прокладок часто відмовляються, що дає велику економію металу. Але в складних умовах експлуатації (з великою вантажнапруженістю, осьовими навантаженнями та наявністю кривих малих радіусів) для забезпечення стабільності колії необхідно застосовувати металеві підкладки.

В сучасних умовах експлуатації для безстикової колії на залізобетонних шпалах на зарубіжних залізницях використовують декілька типів конструкцій безпідкладкових пружних рейкових скріплень типів: «Пендрол» (Великобританія), «Фоссло» (Німеччина), СБ-3 (Польща), АРС-4 (Росія), ЖБР-65 (Росія), на вітчизняних залізницях застосовуються як підкладкові скріплення типу КБ, КППД-2, КПП-12, СКД-65Б, так і безпідкладкові типів КПП-1, КПП-5, КПП-7.

Але умови експлуатації українських залізниць відрізняються від західноєвропейських значно більшими об'ємами перевізної роботи, інтенсивністю руху поїздів і суттєво більшими масами поїздів та осьовими навантаженнями від рухомого складу.

Тому в даній дисертаційній роботі поставлена основна задача: науково обґрунтувати визначення характеристик просторової жорсткості і пружності

рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих для сучасних умов експлуатації залізниць України.

Розрахунок залізничної колії на міцність є одним із складних розділів загальної проблеми досліджень взаємодії колії і рухомого складу. Вигин рейки у горизонтальній площині і кручення рейки при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил є найбільш складними видами деформації рейкової нитки, розрахунки яких мають суттєву складність. В більшості існуючих досліджень ці види деформацій розглядалися окремо від вертикального вигину рейки. У деяких із них горизонтальний вигин і кручення представлені як деформації спільного походження, в інших – окремого. Вивчення горизонтального вигину і кручення рейкової нитки необхідні для вирішення великої кількості завдань, пов'язаних із забезпеченням безпеки руху поїздів перш за все в кривих ділянках колії, а саме: для уточнень існуючих спрощених методів розрахунку рейок на міцність, що в свою чергу дозволить більш обґрунтовано встановлювати допустимі швидкості руху в кривих, а також для створення загальної теорії проектування найбільш раціональних конструкцій залізничної колії.

Питанням визначення характеристик, що сформульовані в основній задачі дисертації, в свій час займалися такі вітчизняні вчені: професори С.П. Тимошенко, А.М. Годицький–Цвірко, М.Л. Корольов, Г.М. Шахунянц, М.І. Кулагін, Н.К. Снітко, В.Г. Альбрехт, О.П. Єршков; кандидати техн. наук С.А. Стюпкін, Д.Г. Голованов, А.П. Татуревич, М.І. Уманов та ін. В теперішній час, в українській науці, найбільш досконало вивченням вказаної проблеми займається доктор технічних наук, професор Е.І. Даніленко.

У другому розділі викладені експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток.

Для проведення експерименту були використані ділянки з проміжними скріпленнями: КПП-5, КПП-1, СБ-3, КБ, Д0. Для проведення досліджень були обрані рейкові пліти в діючій колії виходячи із наступних технічних параметрів:

- тип рейки – Р65, Р50;
- тип шпали – залізобетонні, дерев'яні.
- конструкція колії:
 - а) безстикова колія (на залізобетонних шпалах);
 - б) ланкова колія (на дерев'яних шпалах):
- тип проміжного скріплення:
 - а) при залізобетонних шпалах – КБ, КПП-5, КПП-1, СБ-3;
 - б) при дерев'яних шпалах – Д0.

Для отримання достовірних результатів вимірювання проводились у 2014-2015 рр. протягом 6 місяців на ділянках колії, які експлуатуються на території ДТГО «Південно-Західна залізниця», а саме на головних і приймально-відправних коліях:

- ст. Київ-Волинський; - ст. Вишневе; - ст. Київ-Пасажирський; - ст. Протасів Яр; - ст. Київ-Московський.

Для визначення поперечної жорсткості та стійкості колії була розроблена методика вимірювань, яка дозволяє відслідковувати величину поперечного

переміщення характерних точок рейки, а саме бокових граней головки і підшви рейки (див. рис. 1).

При дослідженнях визначали поперечну горизонтальну жорсткість рейкових ниток по головці і підшві, для чого відслідковували величину поперечних переміщень, а саме кромки головки і підшви рейки у фіксованих перерізах, де прикладалась поперечна горизонтальна сила.

Для проведення досліджень автором було запроєктовано і створено спеціальне обладнання, яке складалось з колійного домкрату ДК-20, обладнаного гідравлічним манометром для вимірювання тиску, і жорсткої горизонтальної штанги для упору в рейкову нитку, протилежну від домкрату. Бокові переміщення головки і підшви рейки фіксувались і вимірювались індикаторами годинникового типу з точністю до сотих часток міліметра.

Горизонтальне поперечне навантаження на рейку створювалось домкратом, шляхом нагнітання тиску в робочому циліндрі, що фіксувалось манометром, вбудованим в тіло домкрату. Навантаження рейки проводилось ступенями через 2 т в інтервалі від 0 до 8 т. Для отримання достовірних результатів вимірювання бокових переміщень головки і підшви рейки виконувалось для кожного типу скріплень не менше, ніж в 3 перерізах. Вимірювання проводились без створення вертикального навантаження. До початку досліджень манометр горизонтального тиску був протарований в лабораторії інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

Загальний вигляд розстановки приладів при проведенні досліджень по вимірюванню поперечної горизонтальної жорсткості рейкових ниток представлений на рис. 1. На рис. 2 показано домкрат і манометр, за допомогою яких створювалось горизонтальне навантаження і проводились вимірювання горизонтальної жорсткості рейкових ниток.

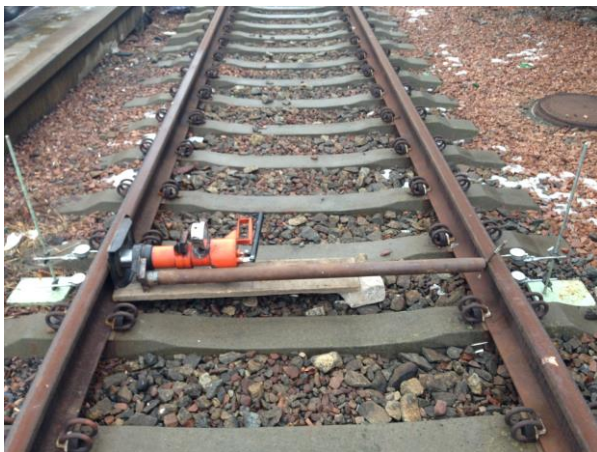


Рисунок 1 – Розстановка приладів для вимірювання переміщень кромки головки і підшви рейки при скріпленні КПП-5



Рисунок 2 – Манометр для вимірювання горизонтального тиску, закріплений на колійному домкраті ДК-20

Залежність горизонтальних переміщень головки і підшви рейки від горизонтального навантаження виходить істотно нелінійною, тому що спочатку

відбувається вибірка люфтів в деталях кріплення рейки до шпали, і тільки на другому етапі (приблизно після прикладеного навантаження $H=40$ кН) відбувається саме бокове переміщення рейкової нитки від дії горизонтальної сили. Тому при аналізі й обробці матеріалів експериментальних досліджень, при визначенні горизонтальної бокової жорсткості рейкових ниток, до заключного аналізу приймалися тільки результати замірів бокових прогинів головки і підшви рейки ($y_{зол}; y_{нід}$), які були отримані при дії бокових сил $H=40$ кН і більше, а саме $H=40,60,80$ кН. В заключну таблицю результатів вносились середні значення бокових переміщень головки $y_{зол}^{cp}$ і підшви $y_{нід}^{cp}$ рейки, отримані по трьох перерізах.

Бокову поперечну жорсткість рейкових ниток знаходили при відсутності вертикальної сили P і визначали відповідно до існуючої методики, розробленої проф. О.П. Єршковим, як відношення прикладеної до рейки сили $H_{бок}$ до поперечного переміщення:

$$\left. \begin{aligned} \beta_y^{зол} &= \frac{H}{y_{зол}^{cp}}; \\ \beta_y^{нід} &= \frac{H}{y_{нід}^{cp}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

У підсумку, за результатами вимірювань бокових переміщень рейкових ниток по головці і підшві при дії бокових сил $H=40,60,80$ кН (тобто без урахування деформацій рейок, що витрачаються на вибірку люфтів в деталях скріплень) визначались осередненні значення жорсткості рейкових ниток по головці і підшві ($\beta_{y(cp)}^{зол}; \beta_{y(cp)}^{нід}$) за формулою (2), як середнє арифметичне значення від замірів не менше як в трьох перерізах, при різних значеннях бокових сил.

$$\left. \begin{aligned} \beta_{y(cp)}^{зол} &= \frac{\sum (\beta_{y(H=40)}^{зол} + \beta_{y(H=60)}^{зол} + \beta_{y(H=80)}^{зол})}{3} \\ \beta_{y(cp)}^{нід} &= \frac{\sum (\beta_{y(H=40)}^{нід} + \beta_{y(H=60)}^{нід} + \beta_{y(H=80)}^{нід})}{3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Діапазон бокових сил $H=40,60,80$ кН при визначенні бокової жорсткості рейкових ниток розглядався як найбільш реальний діапазон цих сил, що реалізуються при динамічній взаємодії рухомого складу і колії.

В табл. 1 приведені заключні, статистично оброблені, результати вимірювань пружних горизонтальних переміщень головки і підшви рейок Р65 ($y_{зол}^{cp}; y_{нід}^{cp}$) при різних значеннях горизонтальної бокової сили H , а також при різних типах рейкових скріплень і різних видах шпал, укладених із епурою 1840 шт/км. В додатку А дисертації наведені дані експериментальних вимірювань поперечних переміщень кромки головки і підшви рейок для різних типів скріплень і на різних дослідних ділянках. В тій же табл. 1 приведені значення горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток, які визначені за формулами (1).

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Тип ВБК			Бокова сила $H, \text{кН}$	Переміщення головки і підшви рейки, мм		Горизонтальна поперечна жорсткість рейкових ниток, кН/мм			
				$y_{\text{зол}}^{\text{cp}}$	$y_{\text{під}}^{\text{cp}}$	$\beta_y^{\text{зол}}$	$\beta_{y(\text{cp})}^{\text{зол}}$	$\beta_y^{\text{під}}$	$\beta_{y(\text{cp})}^{\text{під}}$
Залізобетонні шпали, 1840 шт/км	КБ	P-65	0	0	0	0	0	0	0
			40	2,04	1,01	19,41	17,71	39,71	38,92
			60	3,54	1,54	16,93		38,84	
			80	4,77	2,09	16,78		38,21	
Залізобетонні шпали, 1840 шт/км	КБ	P-50	-	-	-	-	12,68	-	31,41
Залізобетонні шпали, 1840 шт/км	КПП-5	P-65	0	0	0	0	0	0	0
			20	1,04	0,25	19,29	18,80	80,01	72,44
			40	2,14	0,51	18,68		77,80	
			60	3,17	0,90	18,91		66,60	
			80	4,37	1,23	18,32		65,26	
Залізобетонні шпали, 1840 шт/км	КПП-1	P-65	0	0	0	0	0	0	0
			20	1,09	0,28	18,30	17,87	70,90	68,27
			40	2,25	0,58	17,74		69,26	
			60	3,36	0,92	17,84		64,66	
			80	4,54	-	17,61		-	
Залізобетонні шпали, 1840 шт/км	СБ-3	P-65	0	0	0	0	0	0	0
			60	4,49	1,39	13,35	14,20	43,19	51,00
			80	5,31	1,36	15,06		57,87	
Дерев'яні шпали, 1840 шт/км	Д0	P-65	-	-	-	-	19,20*	-	35,73***
Дерев'яні шпали, 1840 шт/км	Д0	P-50	-	-	-	-	13,50**	-	27,00**
Дерев'яні шпали, 1840 шт/км	Д0	P-43	-	-	-	-	11,80**	-	23,60**

* - за даними ВНДІЗТ

** - за даними проф. О.П. Єршкова

*** - по перерахунку від жорсткості P50 прийнятої за даними проф. О.П. Єршкова (див. список літератури в дисертації).

У третьому розділі виконано теоретичне вирішення задачі з визначення бокового модуля пружності колії.

Найбільш відомий в спеціальній літературі метод розрахунку рейки при спільному розгляді горизонтального вигину і кручення належить відомому вченому професору С.П. Тимошенку, що був розроблений ученим ще на початку ХХ століття, у 1920-1930 рр. (див. список літератури в дисертації)

Для розв'язання цієї задачі проф. С.П. Тимошенко використовував схему в якій розглядав тільки дію горизонтального вигину і кручення без врахування зв'язку підшви рейки із основою.

Порівнюючи дані, отримані розрахунковим і дослідним шляхами, С.П. Тимошенко прийшов до висновку, що при дослідженні горизонтального вигину рейкової нитки цілком можливо розглядати її як балку, що лежить на суцільній пружній основі. До недоліків рішення С.П. Тимошенка можна віднести громіздкість алгебраїчних викладок (знаходження коренів диференціального рівняння 8-го

ступеня) і, найголовніше, це - відсутність врахування сил тертя між рейкою і підрейковою основою, що є суттєвим фактором при дії вертикальних динамічних сил, які практично завжди перевищують діючі горизонтальні сили.

На цей недолік рішення С.П. Тимошенка першим звернув увагу професор ВНДІЗТ О.П. Єршков і ним вперше у вітчизняній науці було розроблено нове вирішення задачі розрахунку рейкової нитки при спільній дії на неї позакентрово прикладених вертикальних і горизонтальних сил з урахуванням кручення рейки і виникаючих сил третя по підшві рейки. При цьому в якості вихідного розрахункового апарату О.П. Єршковым були прийняті теоретичні розробки проф. С.П. Тимошенка.

Для розв'язання поставленої в дисертації задачі нами була використана розрахункова схема проф. О.П. Єршкова (рис. 3), в якій розглядається робота рейки на пружній основі при одночасно діючих позакентрово прикладених вертикальної і горизонтальної сил P і H . При цьому, в розрахунковій схемі враховуються сили тертя між рейкою і рейковою основою, що є важливим фактором при дії вертикальних динамічних сил, які практично завжди перевищують діючі горизонтальні сили.

Вирішення даної задачі розроблено під керівництвом наукового керівника проф. Е.І. Даніленка і основні тези даного рішення викладені в декількох спільних роботах авторів [2, 3, 5].

Згідно обраної розрахункової схеми розглядається рівняння рівноваги рейкової нитки в горизонтальній поперечній площині для випадку спільної дії на рейку горизонтальної і вертикальної сил і з урахуванням сил тертя, що виникають між підшоною рейки і основою при поперечному переміщенні рейки. При цьому для статичної задачі приймається, що сили P і H розглядаються як статичні сконцентровані сили, які прикладені в одному поперечному перерізі, перпендикулярному поздовжній осі рейки.

Для прийнятої розрахункової схеми на рис. 3, рівняння рівноваги рейкової нитки в горизонтальній площині згідно досліджень проф. О.П. Єршкова має вигляд:

$$\sum q_y + \sum T_y = H \quad (3)$$

У рівнянні (3) позначено:

q_y - реактивне бічне відхилення підшви рейки в перерізі прикладення сили H ;

$\sum q_y$ - сумарне реактивне відхилення по всій довжині бічної деформації підшви;

T_y - реактивна складова сил тертя по підшві рейки в перерізі прикладання сили H ;

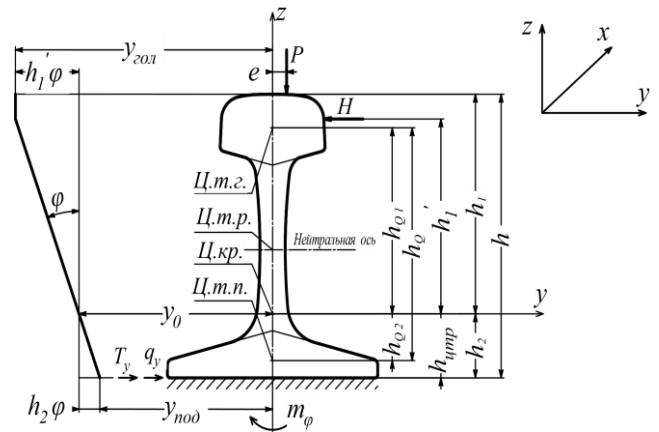


Рисунок 3 – Розрахункова схема дії сил на елементарну ділянку рейкової нитки при горизонтальному згині і крученні

ΣT_y - сумарна реакція сил тертя по всій довжині поперечної (бічної) деформації підшви.

Схема просторового вигину рейки при спільній дії вертикального і горизонтального бокового навантаження приведена на рис. 3. При цьому, розповсюдження пружної хвилі у вертикальній площині залежить від вертикального навантаження та від модуля пружності підрейкової основи U_z і коефіцієнта k_z ; а розповсюдження пружної хвилі в горизонтальній боковій площині залежить від горизонтального бокового навантаження та від таких же пружних характеристик – U_y і k_y . Довжина ділянки тертя по підшві рейки $2x_T$ розповсюджується в межах довжини хвилі пружного вигину рейки в горизонтальній боковій площині $2\left(\frac{3\pi}{4k_y}\right)$.

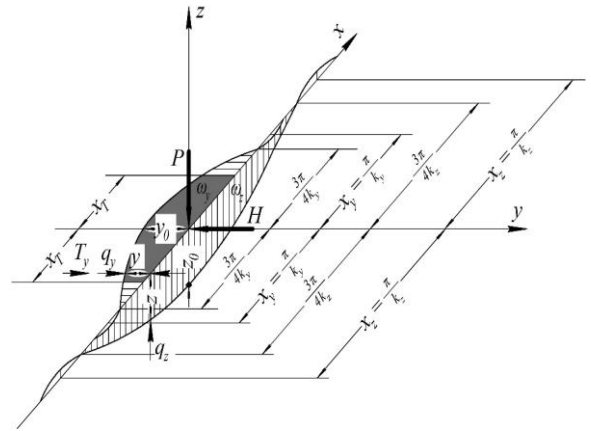


Рисунок 4 – Схема просторового вигину рейки при дії вертикального і горизонтального (бокового) навантаження

Проф. О.П. Єршковим отримано заключну розрахункову формулу для визначення горизонтального модуля пружності колії з урахуванням сил тертя по підшві рейки при спільній дії вертикальної і горизонтальної сил:

$$U_y^{(r)} = U_y \cdot \frac{H/P}{H/P - f_1 \cdot a} \quad (4)$$

де, f_1 – коефіцієнт тертя по підшві рейки при горизонтальному згині. (О.П. Єршковим цей коефіцієнт прийнято постійним $f_1=0,15$ для скріплень типу Д0 на дерев'яних шпалах). В дійсності, згідно наших досліджень, коефіцієнт f_1 потрібно приймати різним для різних типів скріплень;

a – коефіцієнт, що враховує співвідношення горизонтальної і вертикальної жорсткостей в рейковій нитці (О.П. Єршковим для існуючих на той час натурних конструкцій колії значення цього коефіцієнта було рекомендовано приймати постійним і рівним $a=0,9$).

Дана формула стала достатньо відомою і почала широко використовуватись починаючи із 1960-1970 рр. при розрахунках верхньої будови колії на міцність, особливо у випадку відсутності експериментальних даних по жорсткості конкретних рейкових ниток, які розглядаються.

Однак, як показали сучасні дослідження проф. Е.І. Даніленка, формула (4) не є абсолютно коректною і потребує коригування в частині коефіцієнтів a і f_1 як для сучасних типів рейко-шпальної решітки на залізобетонних шпалах і нових типів рейкових скріплень, так і для рейко-шпальної решітки на дерев'яних шпалах, з

урахуванням різних типів рейок і різних співвідношень між горизонтальною і вертикальною силами P/H .

В результаті досліджень [3, 5], виконаних під керівництвом проф. Е.І. Даніленка, встановлено, що величина коефіцієнта a змінюється в залежності від: конструкції підрейкової основи, рейкових скріплень, співвідношення вертикальної і горизонтальної сил P/H і довжини ділянки x_T – пружної півхвилі тертя по підшві рейки при горизонтальному згині рейки в умовах спільної дії сил P і H , тобто $a = f(k_z, P/H, x_T)$.

Для узагальнення всіх діючих сил на довжині поперечної (бокової) деформації рейки і вирішення задачі знаходження бокового модуля пружності рейкової колії, згідно з дослідженнями проф. О.П. Єршкова, слід переписати рівняння (3) в інтегральній формі:

$$\int_{-x_y}^{+x_y} U_y (y - \varphi \cdot h_2) dx + \int_{-x_y}^{+x_y} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx = H \quad (5)$$

Тут $\pm x_y$ - межі інтегрування при горизонтальному згині.

Використовуючи теорію розрахунків балок на пружній основі схему просторового вигину балки в двох площинах – вертикальній і горизонтальній – під дією сили P і H можна навести у вигляді, як показано на рис. 3. Зі схеми на рис. 3. можна побачити, що для забезпечення достатньої точності розрахунків перший

інтеграл $\int_{-x_y}^{+x_y} U_y (y - \varphi \cdot h_2) dx$ рівняння (4) можна брати в межах від $-x_y = -\frac{\pi}{k_y}$ до $+x_y = +\frac{\pi}{k_y}$

За дослідженнями проф. Е.І. Даніленка [3], під першим інтегралом в рівнянні (5) вираз $(y - \varphi \cdot h_2)$ позначає поперечні переміщення підшви рейки, а інтеграл без модуля пружності U_y являє собою площу епюри $\omega_y^{(n)}$ ординат поперечного переміщення підшви рейки:

$$\int_{-\frac{\pi}{k_z}}^{+\frac{\pi}{k_z}} (y - \varphi \cdot h_2) \cdot dx = \omega_y^{(n)} \quad (6)$$

Тобто, весь інтеграл рівняння (5) можна переписати у вигляді:

$$\int_{-x_y}^{+x_y} U_y (y - \varphi \cdot h_2) \cdot dx = U_y \cdot \omega_y^{(n)} \quad (7)$$

Після підстановки виразу (7) у рівняння (5) можна отримати вираз для знаходження модуля бокової пружності рейкової колії:

$$U_y = \frac{H - \int_{-x_y}^{+x_y} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx}{\omega_y^{(n)}} \quad (8)$$

Другий інтеграл рівняння (5) $\left(\int_{-x_y}^{+x_y} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx \right)$, згідно [3], може існувати лише в межах довжини горизонтального згину рейки, тобто в межах від $-x_y = -x_T$; $+x_y = +x_T$, або інакше можна записати, що x_y змінюється в межах $+x_T \geq x_y \geq -x_T$

де x_T - є довжиною півхвилі ділянки тертя по підшві рейки при спільній дії горизонтальної і вертикальної сил. Таким чином, формула (8) може бути переписана в наступному вигляді:

$$U_y = \frac{H - \int_{-x_T}^{+x_T} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx}{\omega_y^{(n)}} \quad (8)^*$$

При цьому величина x_T , згідно [3], не може бути більше довжини активної (додатної) зони півхвилі горизонтального поперечного згину рейки тобто $x_T \leq \frac{3\pi}{4k_y}$, оскільки тертя по підшві рейки від дії вертикальної сили реалізується лише на активній ділянці горизонтального згину рейки.

З експериментальних досліджень вертикального вигину рейкової нитки під дією вертикальної сконцентрованої сили P проф. О.П. Єршковим отримано наступне співвідношення між площею епюри прогинів рейкової нитки і вертикальним модулем пружності підрейкової основи:

$$U_z = \frac{P}{\int_{-x_z}^{+x_z} z \cdot dx} = \frac{P}{\omega_z} \quad (9)$$

де $\omega_z = \int_{-\frac{\pi}{k_z}}^{+\frac{\pi}{k_z}} z \cdot dx$ - це площа епюри ординат вертикального прогину рейки в межах інтегрування від $-x_z = -\frac{\pi}{k_z}$ до $+x_z = +\frac{\pi}{k_z}$.

Рівняння (9) можна переписати в іншому вигляді:

$$U_z \cdot \omega_z = P \quad (9)^*$$

Дослідженнями професорів О.П. Єршкова і Е.І. Даніленка встановлено, що для практичних цілей виявляється достатнім брати до розрахунку довжину пружної хвилі прогинів в межах від $x_{\min} = -\frac{\pi}{k_z}$ до $x_{\max} = +\frac{\pi}{k_z}$ (це названо розрахунковою ділянкою пружної хвилі прогинів).

Оскільки з рівняння (9) випливає, що при інтегруванні в межах повної довжини пружної хвилі вертикальних прогинів (в межах розрахункової ділянки) $+\frac{\pi}{k_z} \geq x_z \geq -\frac{\pi}{k_z}$ має місце рівність:

$$\int_{-\frac{\pi}{k_z}}^{+\frac{\pi}{k_z}} U_z \cdot z \cdot dx = P \quad (10)$$

то для ділянки $+x_T \geq x_y \geq -x_T$, на якій реалізується тертя по підшві рейки при спільній дії горизонтальної і вертикальної сил можна записати:

$$\int_{-x_T}^{+x_T} U_z \cdot z \cdot dx = a \cdot P \quad (11)$$

Тоді формулу (8)*, після підстановки формули (11), отримаємо у вигляді:

$$U_y = \frac{H - f \cdot a \cdot P}{\omega_y^{(n)}} \quad (12)$$

де коефіцієнт a визначає частину участі вертикальної сили у формуванні площі епюри тертя, тобто опір поперечним переміщенням по підшві рейки при спільній дії горизонтальної поперечної сили H і вертикальної P .

Як встановлено нашими дослідженнями [3], для сучасних конструкцій верхньої будови колії коефіцієнт a може змінюватись у межах від $a_{\min} = 0$ до $a_{\max} = 1,00$ і не може бути $a > 1,00$, оскільки епюра сил тертя може існувати тільки в межах довжини хвилі горизонтального поперечного згину рейки.

Значення коефіцієнта a можна визначити із співвідношень формул (11) і (10):

$$a = \frac{\int_{-x_T}^{+x_T} z \cdot dx}{\int_{-\frac{\pi}{k_z}}^{+\frac{\pi}{k_z}} z \cdot dx} \quad (13)$$

Після інтегрування отримано кінцевий вираз для обрахунку коефіцієнта a у вигляді:

$$a = \frac{e^{-k_z \cdot x_T} \cdot \cos k_z \cdot x_T - 1}{e^{-\pi} \cdot \cos \pi - 1} \quad (14)$$

З формули (14) можна побачити, що значення коефіцієнта a змінюються в залежності від k_z - коефіцієнта відносної жорсткості основи і рейки у вертикальній площині, і крім цього, змінюються в залежності від x_T - довжини пружної півхвилі ділянки тертя по підшві рейки при горизонтальному згині від спільної дії горизонтальної і вертикальної сил. Довжина ділянки x_T в свою чергу залежить від співвідношення вертикальної і горизонтальної сил $x_T = f(P/H)$.

Таким чином, значення коефіцієнта a повинно бути різним для різних типів рейок і різних конструкцій підрейкової основи і рейкових кріплень, і вони мають змінюватись при зміні співвідношень діючих сил P/H , тобто $a = f(k_z, P/H, x_T)$. Даний висновок, отриманий проф. Е.І. Даніленком, є принциповою відмінністю від розрахункових положень прийнятих проф. О.П. Єршковим, де прийнято $a = 0,9 = const$, незалежно від особливостей конструкції верхньої будови колії, тобто незалежно від k_z і k_y , а також незалежно від співвідношення P/H .

В результаті після деяких перетворень проф. Е.І. Даніленком отримана заключна розрахункова формула для визначення фактичного (реального) модуля пружності колії в горизонтальній поперечній площині, яка в цілому є аналогічною до формули (4) проф. О.П. Єршкова.

$$U_y^{(T)} = U_y \frac{H_{\text{дин}}/P_{\text{дин}}}{H_{\text{дин}}/P_{\text{дин}} - a \cdot f_1} \quad (15)$$

Але формула (15) хоч і має аналогічний вигляд з формулою проф. О.П. Єршкова, проте, суттєва відмінність полягає у тому, що у формулі (15) коефіцієнт a не є постійною величиною $a \neq const$, а визначається за формулою (14).

Також не є постійною довжина півхвилі площини тертя x_T підшви рейки по підрейковій основі, яка залежить від коефіцієнтів a і k_z .

Коефіцієнт тертя по підшві рейки f_1 також потрібно приймати різним в залежності від типів рейкових скріплень і рейкових опор. Згідно виконаних нами досліджень, отримані наступні значення коефіцієнта f_1 для різних скріплень, відповідно: КБ – 0,3; КПП-5 – 0,32; КПП-1 – 0,28; Д0 – 0,15.

Графік залежності a і x_T в функції від P/H має вигляд, що приведений на рис. 5.

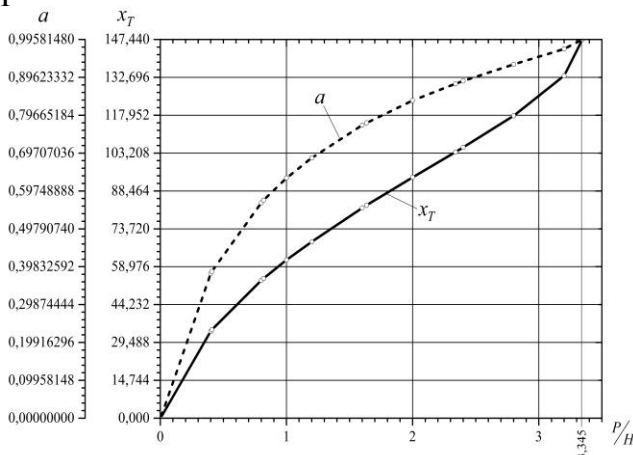


Рисунок 5 – Графік залежності a і x_T в функції від P/H (для рейок Р65, шпали залізобетонні 1840 шт/км, скріплення - КБ)

За новою розрахунковою методикою автором дисертації були виконані багатоваріантні розрахунки фактичних значень модуля поперечної пружності рейкової нитки $U_y^{(T)}$ для сучасних конструкцій колії різних

типів (шпали – дерев'яні, залізобетонні, рейки типу Р65, Р50, UIC60), при різних конструкціях скріплень (КБ, КПП-1, КПП-5, Д0), при різних ймовірних співвідношеннях сил $P_{дин}/H_{дин}$.

Результати розрахунків для одного із ймовірних варіантів співвідношення сил $P_{дин}/H_{дин}$ наведено в табл. 2. Результати

розрахунків для інших варіантів $P_{дин}/H_{дин}$ наведено в дисертації в додатку Б.

Таблиця 2 – Значення модулів пружності підрейкової основи U_y , $U_y^{(T)}$ для різних конструкцій колії

Тип скріплення	Тип рейки	Епюра	Горизонтальний поперечний модуль пружності підрейкової основи $U_y, U_y^{(T)*}, \text{кг}/\text{см}^2$	
			U_y ($P=0, H \neq 0$)	$U_y^{(T)*}$ ($P \neq 0, H \neq 0$)
КБ	Р65	1680	283,943	740,020
		1840	310,985	810,551
КБ	UIC60	1680	282,488	763,830
		1840	309,392	836,631
КБ	Р50	1680	244,962	739,600
		1840	268,292	810,096
КПП-5	Р65	1680	650,087	1718,439
		1840	712,000	1883,198
КПП-5	UIC60	1680	647,304	1821,840
		1840	708,952	1996,543
КПП-1	Р65	1680	600,677	1321,535
		1840	657,884	1448,080
Д0	Р65	1840	245,044	311,476
		2000	266,352	338,594
Д0	Р50	1840	219,300	340,455
		2000	238,370	370,094
Д0	Р43	1840	207,662	326,450
		2000	225,720	354,898

(*) – значення вертикальної і горизонтальної сил прийнято рівним найбільш ймовірним значенням: на залізобетонних шпалах $P_{дин} = 16350 \text{ кг}$, $H_{дин} = 7000 \text{ кг}$; на дерев'яних шпалах $P_{дин} = 17850 \text{ кг}$, $H_{дин} = 7000 \text{ кг}$, що мають місце в динаміці при взаємодії вантажного 4-х осьового вагону з рейковою колією в кривій $R \approx 800 \text{ м}$ при русі зі швидкістю $V = 90 \text{ км}/\text{год}$.

В заключному результаті розрахунків $U_y^{(T)}$ при різних співвідношеннях вертикальної горизонтальної сил P/H з'явилась побудова графічної функціональної залежності $U_y^{(T)} = f(P/H)$ для різних конструкцій колії (рис. 6).

У четвертому розділі наведено теоретичні розрахунки з визначення жорсткості і модуля пружності колії при крученні рейкової нитки при спільній дії на рейку вертикальної і горизонтальної сил P і H .

Практичне вирішення даної досить складної теоретичної задачі про опір крученню рейкової нитки, закріпленої скріпленнями на підрейкових опорах для різних конструкцій ВБК виконано автором дисертації під керівництвом наукового керівника проф. Е.І. Даніленка, на основі його сучасного теоретичного рішення вказаної проблеми, виконаної в розвиток робіт проф. О.П. Єршкова.

Для вирішення задачі використовується та ж схема (рис.3), що розглядалась при визначенні горизонтального модуля пружності $U_y^{(T)}$.

Згідно теоретичних рішень проф. О.П. Єршкова і Е.І. Даніленка рівняння рівноваги рейки при її крученні відносно поздовжньої осі x має вигляд:

$$\sum m_x - \sum q_y \cdot h_2 - T_y \cdot h_2 = M_{кр} \quad (16)$$

де m_x - реактивний опір крученню рейки в перерізі прикладання зовнішнього крутного моменту, який визначається як $m_x = U_\varphi \cdot \varphi$; де U_φ - модуль пружності підрейкової основи при крученні рейкової нитки; φ - кут кручення рейки;

У виразі (16) $\sum m_x$ - перша складова сумарного реактивного опору крученню рейки по всій довжині деформації кручення, викликана реактивними моментами m_x ;

q_y - реактивний опір підшви рейки її бічному переміщенню від дії крутного моменту $q_y = U_y(y - \varphi \cdot h_2)$

$\sum q_y \cdot h_2$ - друга складова сумарного реактивного опору крученню рейки по всій довжині деформації кручення, викликана реактивними силами $\sum q_y$, де U_y - боковий модуль пружності підрейкової основи; y - горизонтальне переміщення центру вигину рейки (який збігається з центром кручення) від дії бічної сили H ; h_2 - відстань від центру кручення рейки до низу підшви.

$\sum T_y \cdot h_2$ - третя складова сумарного реактивного опору крученню рейки по всій довжині деформації кручення, викликана реактивними силами $\sum T_y$, де T_y - реактивна складова сил тертя по підшві рейки $T_y = U_z \cdot z \cdot f$; U_z - модуль

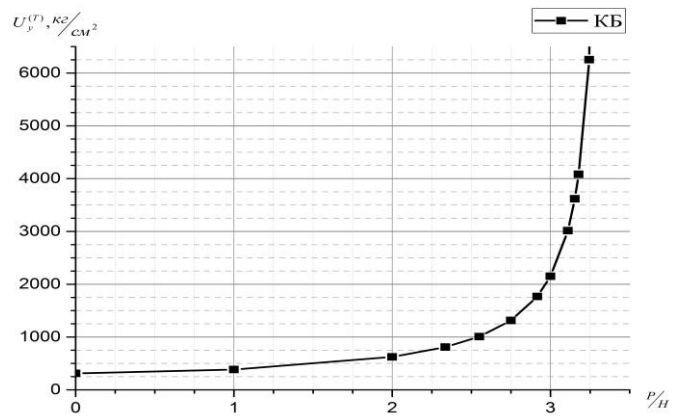


Рисунок 6 – Графік функціональної залежності $U_y^{(T)} = f(P/H)$ для рейок типу Р65 і скріплень типу КБ

вертикальної пружності підрейкової основи; z - вертикальне переміщення центру вигину рейки від дії вертикальної сили P ; f - коефіцієнт тертя по підшві рейки (залежить від типу скріплення і підрейкових прокладок);

$M_{кр}$ - зовнішній крутний момент, що діє на рейку при спільній дії сил H і P знаходиться за формулою:

$$M_0^{кр} = H \cdot h'_1 - P \cdot e \quad (17)$$

де h'_1 - відстань від центру кручення до місця прикладання сили H ;

e - ексцентриситет прикладання сили P відносно осі симетрії рейки.

Для узагальнення дії всіх сил на довжині деформації закручування рейки в дослідженнях проф. О.П. Єршкова і Е.І. Даніленка рівняння (16) виражено в інтегральній формі, з підстановкою всіх складових. Після цього отримано наступне рівняння:

$$\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} U_\varphi \cdot \varphi \cdot dx - h_2 \left[\int_{-x_y}^{+x_y} U_y (y - \varphi \cdot h_2) dx + \int_{-x_T}^{+x_T} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx \right] = H \cdot h'_1 - P \cdot e \quad (18)$$

Вираз у квадратних дужках рівняння (18) відповідно до зауважень попереднього розділу (3) про існування другого інтегралу в квадратних дужках тільки в межах від $-x_T$ до $+x_T$, можна замінити силою H . Тоді рівняння (18) переписується в більш простому вигляді:

$$\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} U_\varphi \cdot \varphi \cdot dx - h_2 \cdot H = H \cdot h'_1 - P \cdot e \quad (19)$$

Згідно досліджень О.П. Єршкова, інтеграл $\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} \varphi \cdot dx$ - являє собою площу епюри кутів кручення в межах довжини хвилі кручення рейки (яка практично відповідає

довжині бокового вигину рейки) $\int_{-x_\varphi}^{+x_\varphi} \varphi \cdot dx = \omega_\varphi$.

$$\text{О.П. Єршковим знайдено, що } \omega_\varphi = \frac{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}}{h''}; \quad \omega_y^{(n)} = \frac{\omega_y^{(z)}}{\delta} \quad (20)$$

де $\omega_y^{(n)}$ і $\omega_y^{(z)}$ - площі епюр поперечних переміщень підшви і головки рейки; h'' - відстань між точками вимірів поперечних переміщень головки і підшви рейки;

$\delta = \frac{\omega_y^{(n)}}{\omega_y^{(z)}}$ - співвідношення площ епюр переміщень головки і підшви рейки.

Проф. Е.І. Даніленком знайдено, що для практичних цілей з достатньою точністю можна приймати коефіцієнт δ рівним відношенню поперечних жорсткостей рейкової нитки по підшві і по головці: $\delta = \frac{\beta_y^{(n)}}{\beta_y^{(z)}}$.

Таким чином, рівняння (19) після підстановки в нього приведених вище пояснень та рішення його відносно U_φ , приймає вигляд:

$$U_{\varphi} = \frac{H(h'_1 + h_2) - P \cdot e}{\omega_{\varphi}} \quad (21)$$

Далі, після підстановки значення ω_{φ} з формули (20) в рівняння (21) проф. О.П. Єршковим отримано наступний вираз для визначення модуля пружності підрейкової основи при крученні рейкової нитки:

$$U_{\varphi} = \frac{H(h'_1 + h_2) \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}} \quad (22)$$

Саме ця формула після опублікування досліджень О.П. Єршкова в 1960 рр. стала використовуватись в дослідженнях при визначенні модуля пружності при крученні рейкової нитки, в тому числі, при спільній дії на рейку позацентрово прикладених вертикальної і горизонтальної сил.

Однак в сучасних дослідженнях (2011-2014 рр.) професором Е.І. Даніленком надано уточнення методики рішення задачі проф. О.П. Єршкова про кручення рейкової нитки при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил. А саме, вказано, що в добре відомій формулі (22) О.П. Єршковим допущена помилка, а саме - в ній відсутній співмножник (h'') в чисельнику другого доданка правої частини рівняння. Як показали наші розрахунки [3, 5], при обчисленнях це може призводити до помилки у визначенні модуля пружності колії на кручення на 15-20% (і більше), в залежності від співвідношення сил.

Згідно досліджень проф. Е.І. Даніленка слід прийняти до уваги, що в реальних умовах взаємодії рухомого складу і колії площа епюри поперечних переміщень рейкової нитки $\omega_y^{(n)}$ визначається при наявності вертикальної сили P і сил тертя по підшві рейки, тобто відношення $\frac{H}{\omega_y^{(n)}}$ слід ідентифікувати як реальне значення бокового модуля пружності підрейкової основи $U_y^{(T)}$, який обчислюється з урахуванням сил тертя:

$$\frac{H}{\omega_y^{(n)}} = U_y^{(T)} \quad (23)$$

Тоді, після підстановки (23) в рівняння (22), проф. Е.І. Даніленком отримано в остаточному вигляді формулу для визначення реального значення модуля пружності колії на кручення $U_{\varphi}^{(T)}$ для випадку спільної дії вертикальних і горизонтальних сил (H і P) і з урахуванням опору скріплень і сил тертя по підшві рейки:

$$U_{\varphi}^{(T)} = \frac{(h'_1 + h_2) \cdot h''}{\delta - 1} \cdot U_y^{(T)} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot H} \cdot U_y^{(T)} \quad (24)$$

Таким чином, реальне значення модуля пружності колії на кручення $U_{\varphi}^{(T)}$, яке враховує спільну дію вертикальних і горизонтальних сил (H і P) і враховує реактивну складову сил тертя T_y по підшві рейки при поперечних деформаціях підшви, викликаних крученням рейки, визначається в кінцевому підсумку в залежності від реального значення горизонтального модуля пружності колії $U_y^{(T)}$, а

також від співвідношення зовнішніх сил P і H і геометричних характеристик рейки, що визначаються величинами h'' і δ .

За новою методикою розрахунків автором дисертації були виконано багатоваріантні розрахунки фактичних значень модуля пружності колії на кручення $U_\varphi^{(T)}$ для різних сучасних конструкцій колії (шпали – дерев'яні, залізобетонні; рейки типу Р65, Р50, UIC60), при різних конструкціях скріплень (КБ, КПП-1, КПП-5, Д0), при різному співвідношенні сил $P_{дин}/H_{дин}$. Результати розрахунків для одного із ймовірних варіантів співвідношення сил $P_{дин}/H_{дин}$ наведено в табл. 3. Результати розрахунків для можливих інших варіантів $P_{дин}/H_{дин}$ наведено в додатку В дисертації.

Таблиця 3 – Значення модулів пружності колії залізобетонних шпалах $P_{дин} = 16350 \text{ кз}$, при крученні рейкової нитки U_φ і $U_\varphi^{(T)}$ для різних $H_{дин} = 7000 \text{ кз}$; на дерев'яних шпалах $P_{дин} = 17850 \text{ кз}$, $H_{дин} = 7000 \text{ кз}$, що

Тип скріплення	Тип рейки	Епюра	Горизонтальний поперечний модуль пружності підрейкової основи $U_\varphi, U_\varphi^{(T)*}, \text{кз/рад}$	
			U_φ ($P=0, H \neq 0$)	$U_\varphi^{(T)*}$ ($P \neq 0, H \neq 0$)
КБ	Р65	1680	34834,906	166335,323
		1840	38152,517	182188,737
КБ	UIC60	1680	25989,831	149732,617
		1840	28465,053	164003,760
КБ	Р50	1680	25054,575	93150,919
		1840	27440,725	102029,718
КПП-5	Р65	1680	34834,906	162536,382
		1840	38152,517	178106,519
КПП-5	UIC60	1680	25989,831	151732,437
		1840	28465,053	166282,583
КПП-1	Р65	1680	34834,906	126415,101
		1840	38152,517	138520,024
Д0	Р65	1840	38152,517	80080,311
		2000	41470,127	87051,831
Д0	Р50	1840	27440,725	53453,482
		2000	29826,875	58104,937
Д0	Р43	1840	22991,733	43461,505
		2000	24991,014	47245,834

В таблиці прийнято:

(*) – значення вертикальної і горизонтальної сил прийнято рівним найбільш ймовірним значенням: на

У п'ятому розділі виконанні теоретичні розрахунки за новим розрахунковим методом напружень і деформацій в головці і підшві рейок для колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах при різних конструкціях рейкових скріплень.

мають місце в динаміці при взаємодії вантажного 4-х осьового вагону з рейковою колією в кривій $R \approx 800 \text{ м}$ при русі зі швидкістю $V = 90 \text{ км/год}$.

На рис. 7 приведено графік функціональної залежності модуля $U_\varphi^{(T)} = f(P/H)$

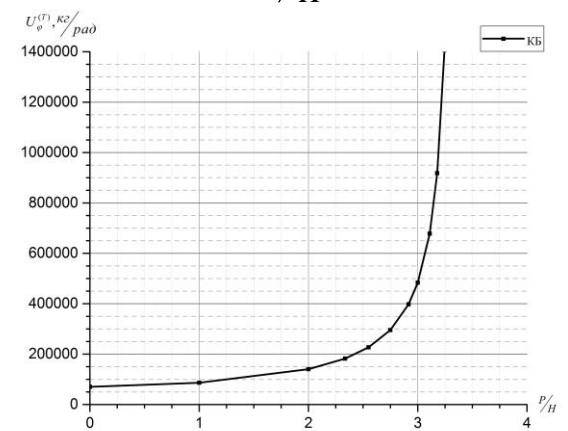


Рисунок 7 – Графік функціональної залежності $U_\varphi^{(T)} = f(P/H)$ для рейок типу Р65 і скріплень типу КБ

При цьому нормальні напруження в головці і підошві рейки від її згину в горизонтальній площині та від згинального скручування знаходяться за формулами:

$$\sigma_{\Sigma_{гориз}}^{гол\ нк} = +E \cdot \frac{I_{гориз}^p}{W_{кр.гол}^p} \cdot y'' + E \frac{I_{гориз}^{гол}}{W_{кр.гол}^{гол}} \cdot h_{Q1} \cdot \varphi''$$

в головці:

$$\sigma_{\Sigma_{гориз}}^{гол\ вк} = -E \cdot \frac{I_{гориз}^p}{W_{кр.гол}^p} \cdot y'' - E \frac{I_{гориз}^{гол}}{W_{кр.гол}^{гол}} \cdot h_{Q1} \cdot \varphi''$$

$$(25)$$

$$\sigma_{\Sigma_{гориз}}^{під\ нк} = +E \cdot \frac{I_{гориз}^p}{W_{кр.під}^p} \cdot y'' - E \frac{I_{гориз}^{під}}{W_{кр.під}^{під}} \cdot h_{Q2} \cdot \varphi''$$

в підошві:

$$\sigma_{\Sigma_{гориз}}^{під\ вк} = -E \cdot \frac{I_{гориз}^p}{W_{кр.під}^p} \cdot y'' + E \frac{I_{гориз}^{під}}{W_{кр.під}^{під}} \cdot h_{Q2} \cdot \varphi''$$

$$(26)$$

Сумарні напруження в головці і підошві рейки від дії вертикальних і горизонтальних сил знаходяться за формулою:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{верт.зг} + \sigma_{\Sigma_{гориз}} \quad (27)$$

Стійкість рейкових ниток проти горизонтального вигину від дії горизонтальних сил і проти кручення від дії крутного моменту визначалась розрахунками горизонтального зміщення головки і підошви рейки і кута кручення рейки при стиснутому крученні.

Горизонтальне зміщення верху головки і низу підошви рейки знаходиться за формулами:

$$y_z = y_0 + h_1' \cdot \varphi_0^T \quad (28)$$

$$y_n = y_0 - h_2 \cdot \varphi_0^T \quad (29)$$

де, y_0 - зміщення центру кручення рейки.

Кут кручення рейки φ_0^T визначається за формулою:

$$\varphi_0^T = \frac{M_0^{кр}}{\beta_{\varphi}^T} \quad (30)$$

де, β_{φ}^T - жорсткість рейкової нитки при стиснутому крученні.

За даною новою методикою автором виконані багатоваріантні розрахунки напруженого стану рейок різних типів при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил, а також розрахунки стійкості рейкових ниток проти горизонтального вигину і кручення. Результати розрахунків наведені в додатку Г дисертації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Удосконалено існуючий метод експериментально-теоретичного рішення задачі з визначення характеристик горизонтального поперечного модуля пружності рейкової нитки при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил для конструкції колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах при різних конструкціях рейкових скріплень. Отримано нові дані для вказаних характеристик.

2. Удосконалено існуючий метод експериментально-теоретичного рішення задачі з визначення характеристик крутильної жорсткості і модуля пружності рейкової нитки при крученні від спільної дії вертикальних і горизонтальних сил для конструкції колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах при різних конструкціях рейкових скріплень. Отримано нові дані для вказаних характеристик.

3. Отримані нові дані розрахункових фізико-геометричних характеристик для рейок сучасного виробництва, які уточнюють існуючі розрахункові характеристики ДСТУ (Україна) і ГОСТ (Росія) і, які дозволяють виконувати розрахунки рейок на міцність з більшою точністю.

4. Вперше для залізниць України виконано теоретичні розрахунки по новому методу з визначення горизонтальної поперечної жорсткості і жорсткості при стиснутому крученні рейкових ниток при різних вітчизняних конструкціях рейкових скріплень і підрейкової основи. Отримані нові результати розрахункових параметрів просторової жорсткості і пружності рейкових ниток для сучасних конструкцій залізничної колії.

5. Вперше для теоретичних вітчизняних розрахунків на міцність колії виконано розрахунки напружень і деформацій в головці і підшві рейок за новим методом з урахуванням фактичних значень вертикальних і горизонтальних сил і крутного моменту при їх спільній дії, отримано нові дані величини напружень і деформацій в рейках при різних типах рейкових скріплень і підрейкових опор.

6. Нова удосконалена методика з визначення горизонтальної поперечної і крутильної жорсткості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень дає можливість отримати більш точні вихідні параметри для перевірки несучої здатності конструкцій залізничної колії в кривих і прямих ділянках.

7. Визначені за представленою методикою характеристики просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні дають можливість встановлювати найбільш раціональні умови експлуатації залізничної колії в кривих і прямих із забезпеченням безпеки руху поїздів і можуть служити основою для удосконалення практичних інженерних розрахунків колії на міцність.

8. Отримані результати розрахунків характеристик просторової жорсткості і стійкості дозволяють давати практичну оцінку міцності, жорсткості, стійкості рейкових ниток і допустимої силової навантаженості при їх стиснутому крученні в кривих; на основі отриманих даних інженери-проектувальники можуть більш раціонально проектувати нові конструкції залізничної колії, вирішувати задачі оптимізації їх параметрів і конструкцій, і більш точно встановлювати допустимі швидкості руху поїздів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні праці:

1. Велінець В.П. Розрахунок рейок на горизонтальний згин та скручування методом С.П. Тимошенко (без врахування сил тертя) і методом О.П. Єршкова (з урахуванням сил тертя). / Велінець В.П. // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. – 2012. Випуск 21. с. 28 – 35.

2. Даніленко Е.І., Велінець В.П. Про необхідність внесення змін до діючого державного стандарту України ДСТУ 4344:2004 на рейки звичайні для

залізниць широкої колії. / Даниленко Е.І., Велінець В.П. // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – К. 2014. Випуск №4. – с. 30 – 37.

3. Даниленко Э.И., Велинец В.П. Теоретическое решение задачи по определению реального бокового модуля упругости пути $U_y^{(T)}$, при совместном действии на рельсовую нить горизонтальных и вертикальных сил. / Даниленко Э.И., Велинец В.П. // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. – 2014. Випуск 24. с. 106 – 122.

4. Велінець В.П. Аналіз робіт по дослідженню горизонтального вигину і кручення рейкової нитки. / Велінець В.П. // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. – 2014. Випуск 25. с. 63 – 70.

5. Даниленко Е.І., Велінець В.П. Експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості і модуля пружності залізничної колії при різних конструкціях рейкових скріплень. / Даниленко Е.І., Велінець В.П. // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – К. 2015. Випуск №4 – с. 3 – 11.

6. Велінець В.П. Огляд робіт по дослідженню горизонтального вигину і кручення рейкової нитки / Велінець В.П. // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – К. 2015. Випуск №6 – с. 7 – 13.

7. Велінець В.П. Експериментальні дослідження горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень / Велінець В.П. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту– Дніпропетровськ, 2015. Випуск №6 – с. 57 – 64.

Додаткові праці:

8. Велінець В.П. Визначення поперечної стійкості рейкових ниток Р65 і УІС60 при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил / Велінець В.П. // наук.-практ. конф. «Шляхи та напрями структурної реформи залізничного транспорту» 23-24 лютого 2012 р.: тези доп. – 2012 р. – с. 82 – 84.

9. Велінець В.П. Динамічні характеристики залізничної колії / Велінець В.П. // наук.-практ. конф. «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» 21 листопада 2012 р.: тези доп. – 2012 р. – с. 202

10. Велінець В.П. До питання визначення характеристик пружності рейкової колії при горизонтальному згині та скручуванні / Даниленко Е.І., Велінець В.П., Білюк І.Ю.// Міжнарод. наук.-практ. конф. «Проблеми взаємодії колії і рухомого складу» 18-19 вер. 2013 р.: тези доп. – 2013 р. – с. 41 – 42.

11. Велінець В.П. Взаємодія вагонів і залізничної колії / Білюк І.Ю., Велінець В.П., Велінець О.П. // Наук.-практ. конф. «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» 12 грудня 2013 р.: тези доп. – 2013 р. – с. 130 – 131.

12. Велінець В.П. Експериментальні дослідження жорсткості і модуля пружності сучасних конструкцій залізничної колії в поперечній площині / Велінець В.П. // Міжнарод. наук.-практ. конф. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд» 09 – 11 вер. 2015 р.: тези доп. – 2015 р. – с. 59 – 60.

АНОТАЦІЯ

Велінець В.П. Визначення характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія. Державний економіко-технологічний університет транспорту, МОН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена визначенню характеристик просторової жорсткості і стійкості рейкових ниток при їх стиснутому крученні в кривих з типовими жорсткими та сучасними пружними рейковими скріпленнями залежно від діючих на рейки вертикальних і горизонтальних бокових сил.

В роботі представлено вирішення наукової задачі спільного впливу горизонтальних поперечних і вертикальних сил при одночасному крученні рейки на роботу рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень в умовах експлуатації залізниць України. Вирішення даної проблеми виконано за допомогою комплексних теоретичних, експериментальних та експлуатаційних досліджень.

Проведені експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток для різних конструкцій рейкових скріплень в умовах експлуатації залізниць України.

Розроблено методику і виконано теоретичні розрахунки з визначення характеристик просторової жорсткості рейкових ниток і модуля пружності колії при їх згині у вертикальній і горизонтальній площинах при одночасному стиснутому крученні під спільною дією вертикальних і горизонтальних колісних навантажень. Також в роботі виконані теоретичні розрахунки з визначення напружень і деформацій в головці і підшві рейок за новим розрахунковим методом для рейок типів Р65, УС60, Р50 на залізобетонних і дерев'яних рейкових опорах при різних конструкціях сучасних рейкових скріплень.

Ключові слова: залізнична колія, рейка, жорсткість, модуль пружності, горизонтальний вигин, кручення.

АННОТАЦИЯ

Велинец В.П. Определение характеристик пространственной жесткости и устойчивости рельсовых нитей при их сжатом кручении в кривых. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 - железнодорожный путь. Государственный экономико-технологический университет транспорта, МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена определению характеристик пространственной жесткости и устойчивости рельсовых нитей при их сжатом кручении в кривых с типичными жесткими и современными упругими рельсовыми скреплениями в зависимости от условий эксплуатации.

В работе представлено решение научной задачи совместного воздействия горизонтальных поперечных и вертикальных сил при одновременном кручении рельса на работу рельсовых нитей при различных конструкциях рельсовых скреплений в условиях эксплуатации железных дорог Украины. Решение данной

проблемы выполнено с помощью комплексных теоретических, экспериментальных и эксплуатационных исследований.

Проведены экспериментальные исследования характеристик горизонтальной поперечной жесткости рельсовых нитей для различных конструкций рельсовых скреплений в условиях эксплуатации железных дорог Украины.

Усовершенствован существующий метод экспериментально-теоретического решения задачи по определению характеристик крутильной жесткости и модуля упругости рельсовой нити при кручении от совместного действия вертикальных и горизонтальных сил для конструкции пути на железобетонных и деревянных шпалах при различных конструкциях рельсовых скреплений. Получены новые данные для указанных характеристик.

Получены новые данные расчетных физико-геометрических характеристик для рельсов современного производства, которые уточняют существующие расчетные характеристики ДСТУ (Украина) и ГОСТ (Россия) и, которые позволяют выполнять расчеты рельсов на прочность с большей точностью.

Впервые для железных дорог Украины выполнены теоретические расчеты по новой расчетной методике по определению горизонтальной поперечной жесткости и жесткости при сжатом витые рельсовых нитей при различных отечественных конструкциях рельсовых скреплений и подрельсового основания. Получены новые результаты расчетных параметров пространственной жесткости и упругости рельсовых нитей для современных конструкций железнодорожного пути.

Впервые для теоретических отечественных прочностных расчетов рельсов выполнены расчеты напряжений и деформаций в головке и подошве рельсов по новому расчетному методу с учетом совместного действия вертикальных и горизонтальных сил и крутящего момента для рельсов типов Р65, UIC60, Р50 на железобетонных и деревянных рельсовых опорах при различных конструкциях современных рельсовых скреплений. Получены новые данные величин напряжений и деформаций в рельсах при различных типах рельсовых скреплений и подрельсовых опор.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельс, жесткость, модуль упругости, горизонтальный изгиб, кручение.

SUMMARY

V. Velinets. Defining characteristics of the spatial stability and stiffness of rail strings in their compressed torsion in curves. – The manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, speciality 05.22.06 – railway track. State Economy and Technology University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

Dissertation is devoted to defining the characteristics of spatial rigidity and stability of rail strings in their cramped twisting curves of a typical modern rigid and elastic rail fastening depending on operating conditions.

The paper presents scientific problem solving joint impact of horizontal and vertical transverse forces while twisting rail track work strands with different designs of rail

fasteners in operation of railways of Ukraine. The solution to this problem is made using complex theoretical, experimental and operational research.

Experimental study of characteristics of horizontal transverse stiffness of rail strings for different designs of rail fasteners in operation of railways of Ukraine.

The technique and performed theoretical calculations to determine the characteristics of spatial rigidity and stability of rail strings when they bend in the vertical and horizontal planes and with their simultaneous compressed torsion under wheel loads, as well as work performed theoretical calculations to determine stresses and strains in the head and sole rails to a new method for rails type P65, UIC60, P50 at various designs of modern rail fasteners on concrete and wooden sleepers.

Key words: ail track, rail, stiffness, elastic modulus, horizontal bending, torsion.

ВЕЛІНЕЦЬ ВІТАЛІЙ ПЕТРОВИЧ

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТОРОВОЇ ЖОРСТКОСТІ І СТІЙКОСТІ
РЕЙКОВИХ НИТОК ПРИ ЇХ СТИСНУТОМУ КРУЧЕННІ В КРИВИХ

05.22.06 – залізнична колія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора