

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені  
академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

МАРКУЛЬ Руслан Володимирович



УДК 625.172:625.143.5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ ТА УТРИМАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ  
КОЛІЇ ІЗ СКРІПЛЕННЯМ ТИПУ КПП-5

Спеціальність 05.22.06 – Залізнична колія

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

РИБКІН Віктор Васильович

Дніпропетровськ 2015

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ДОСЛІДЖЕНЬ НАД РОБОТОЮ ПРОМІЖНИХ РЕЙКОВИХ СКРІПЛЕНЬ. СУТЬ ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	17
1.1 Аналіз робіт, виконаних по темі дослідження, та коротка історична довідка.....	17
1.2 Бічні та вертикальні сили, що виникають в кривих ділянках колії від дії рухомого складу, та їх аналіз по дослідженнях лабораторії ДНУЗТу.....	24
1.3 Методика досліджень напружено-деформованого стану та сил реакцій в елементах проміжних рейкових скріплень, що виникають від дії коліс рухомого складу.....	32
1.4 Висновки до розділу 1.....	34
1.5 Задачі досліджень.....	36
2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ІЗ СКРІПЛЕННЯМ ТИПУ КПП-5.....	38
2.1 Застосування метода кінцевих елементів для дослідження силових та напружено-деформативних характеристик стану елементів проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	38
2.2 Створення розрахункових схем і КЕ-моделей залізничної колії та елементів вузла рейкового скріплення типу КПП-5.....	41
2.2.1 Шпали.....	41
2.2.2 Підрейкова прокладка типу ПРП.....	43

2.2.3 Анкер закладний типу АЗ-2.....	44
2.2.4 Ізолюючий вкладиш типу ВІП-65.....	45
2.2.5 Клема пружна.....	45
2.2.6 Рейка.....	46
2.3 Складання розрахункових схем конструкції залізничної колії з детальним врахуванням елементів у вузлі рейкового скріплення типу КПП-5.....	47
2.4 Дослідження напруженого стану елементів у вузлі рейкового скріплення типу КПП-5.....	52
2.5 Висновки до розділу 2.....	55
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ІЗ СКРІПЛЕННЯМ ТИПУ КПП-5.....	58
3.1 Характеристика експериментальних ділянок та методика досліджень.....	58
3.2 Динамічні сили, що передаються від коліс рухомого складу на рейки. Згинальні напруження в кромках підшви рейки. Вертикальні та горизонтальні деформації рейкової нитки.....	63
3.3 Згиннальні напруження в прутках клеми проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	75
3.4 Порівняльна характеристика результатів розрахунку напруженого стану колії та елементів проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	86
3.5 Висновки до розділу 3.....	90
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОМІЖНОГО РЕЙКОВОГО СКРІПЛЕННЯ ТИПУ	93

КПП-5.....	
4.1 Проектування конструкції колійного пристрою по вимірюванню пружних властивостей елементів проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	93
4.2 Технологія використання конструкції колійного пристрою по вимірюванню пружних властивостей елементів проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	98
4.3 Оцінка величини пружного ходу нової клеми проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	100
4.4 Визначення пружних характеристик нової клеми проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.....	107
4.5 Полігонні дослідження впливу пружних залишкових деформацій елементів рейкового скріплення типу КПП-5 на величину розмикання силового ланцюжка «рейка-клема-прокладка».....	108
4.6 Висновки до розділу 4.....	122
5. РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ КОНТРОЛЮ ТА УТРИМАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ІЗ СКРІПЛЕННЯМ ТИПУ КПП-5.....	126
5.1 Розробка конструкції регульовального елемента з метою роботи вузла скріплення типу КПП-5 під час експлуатації.....	126
5.2 Розробка технології «монтажу-демонтажу» регулюючої пластини під час експлуатації вузла скріплення типу КПП-5.....	128
5.3 Дослідження підвищення стабільності роботи вузла скріплення типу КПП-5 із використанням регулюючої пластини.....	130
5.4 Висновки до розділу 5.....	136
6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ЗАПРОПОНОВАНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО УТРИМАННЮ	139

ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ІЗ СКРІПЛЕННЯМ ТИПУ КПП-5.....	
6.1 Обґрунтування методики розрахунку.....	139
6.2 Визначення експлуатаційних витрат.....	141
6.2.1 Визначення термінів служби рейок по зносу.....	141
6.2.2 Визначення витрат на заміну шпал.....	144
6.2.3 Визначення витрат на заміну проміжних рейкових скріплень.....	146
6.2.4 Визначення витрат на поповнення баласту.....	146
6.2.5 Визначення витрат на оплату праці при поточному утриманні колії.....	147
6.2.6 Визначення витрат на поточне утримання колії.....	148
6.3 Встановлення періодичності ремонту колії.....	149
6.4 Висновки до розділу 6.....	154
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТОК А.....	173
ДОДАТОК Б.....	184
ДОДАТОК В, Д.....	187
ДОДАТОК Г.....	248

## ВСТУП

Україна має добре розвинену інфраструктуру залізниць, для створення яких в першу чергу посприяли високий рівень машинобудування та значний науково-технічний потенціал.

На сьогоднішній день, для більш ефективного використання залізничного транспорту на важливих напрямках Укрзалізниці, відбувається підвищення швидкостей руху вантажних та пасажирських поїздів, збільшення осьового навантаження та вантажонапруженості. Подальший розвиток вище згаданих параметрів ставить перед колійним господарством нові складні задачі, пов'язані із швидким підвищенням міцності та надійності роботи залізничної колії. Одним із заходів щодо покращення конструкції колії являється застосування безстикової колії. Це прогресивна конструкція верхньої будови колії, що дозволяє різко збільшити швидкість руху поїздів без суттєвого збільшення затрат на поточне утримання колії. Однак безстикова колія добре працює при надійному прикріпленні рейкових плітей до підрейкових опор.

Більше чим півтора століття практика експлуатації колії наочно показала, що у всіх видів дерев'яних і залізобетонних підрейкових основ найбільш складним-конструктивно і технологічно вирішальним вузлом, являються проміжні рейкові скріплення. Саме на колійні роботи по утриманню і ремонту скріплень припадає значна доля трудових затрат під час експлуатації колії.

На перших етапах розвитку залізничної колії при відносно невеликих швидкостях руху на дерев'яних шпалах, перші конструкції проміжних рейкових скріплень тривалий час, особливо до 1940 рр., залишались практично без змін: рейка прикріплювалась до шпал за допомогою металевої підкладки та костилів. Однак за рахунок нестачі деревини і з рядом інших причин, відбувається масова заміна дерев'яних шпал та використання

залізобетонних шпал і в кривих малого радіуса. У зв'язку з цим підвищились і розширилися пред'явлені вимоги до скріплень.

Згідно багатовікової практики експлуатації залізничної колії до скріплень пред'являються такі експлуатаційні вимоги:

- зменшення металоємкості та багатoeлементності конструкції;
- забезпечення стабільності ширини колії;
- утримання рейок від уgonу;
- укладання безстикових плітей довжиною у перегін без сезонних температурних розрядок;
- забезпечення оптимальної пружності колії і надійний зв'язок рейок з опорами;
- довготривале забезпечення стабільної ширини колії;
- допускати регулювання положення рейкових ниток по висоті;
- допускати (по можливості) регулювання положення рейкових ниток в плані;
- забезпечувати рейкові нитки від їх поздовжнього переміщення по опорам під дією рухомого складу та температурних сил;
- мати мінімум деталей, бути надійними та технологічними при виготовленні і в експлуатації;
- брати участь при необхідності у створенні електроізоляції одної рейкової нитки від іншої;
- бути економічним;
- допускати механізоване збирання та розбирання;
- допускати можливість розрядки напружень в безстиковій колії і заміну деталей скріплення без переривів в русі поїздів.

За останні роки розроблено велику кількість конструкцій проміжних рейкових скріплень для залізобетонних шпал, але тільки деякі з них, такі як КБ та КПП-5 в результаті довготривалих експлуатаційних спостережень прийняті для широкого застосування в практиці. Однак при довготривалих

експлуатаційних спостережень та виконаних досліджень над скріпленнями типу КБ, були виявлені ряд їх недоліків таких, як:

- складність монтажу-демонтажу під час експлуатації;
- присутність великої кількості різьбових з'єднань;
- багатодетальність;
- висока металоємкість.

Тому для врахування вище перелічених експлуатаційних вимог до проміжного рейкового скріплення та ліквідації недоліків, що присутні у скріплення типу КБ, було запропоновано впровадити на основі без підкладочних без болтових скріплень типу SB-3 польського виробництва вітчизняні скріплення пружного типу КПП-1 а згодом і скріплення типу КПП-5, які б стабільно притискали рейку до підрейкової основи та зменшували б витрати на поточне утримання колії на залізобетонних шпалах.

Однак експлуатація залізничної колії із скріпленням типу КПП-5, показала, що вирішено далеко не всі питання. Одним із факторів по забезпеченню стабільності роботи залізничної колії, являється надійність зв'язків рейок з підрейковою основою, що забезпечується проміжними рейковими скріпленнями.

Під час тривалої експлуатації на ділянках з великою вантажонапруженістю, особливо в кривих малого радіуса, та в стрілочних переводах (в передньому вильоті рамної рейки та в перевідній кривій), де відбувається збільшення поїздного навантаження в поперечно-горизонтальній площині інтенсивно порушується надійність роботи елементів проміжних рейкових скріплень типу КПП-5 із-за частоти відмов його елементів. Це призводить до незабезпечення стабільності характеристик конструкції верхньої будови колії між плановими ремонтами, що нерідко супроводжується додатковими затратами на певних стадіях експлуатації проміжних рейкових скріплень.

Причиною цього є недостатньо вивчена силова робота вузла скріплення типу КПП-5 при експлуатації, яка залежить від багатьох факторів. Від



раціональної силової роботи вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 залежить: просторова жорсткість вузла скріплення; величина опору рейкової нитки поперечному переміщенню (зміна нормативної ширини рейкової колії, пошкодження допоміжних елементів у вузлі скріплення); величина опору поздовжньому переміщенню рейкової нитки (виникнення угону колії), що одночасно загрожує безпеці руху поїздів.

**Актуальність теми.** Як відомо, стратегічним напрямком розвитку залізничного транспорту України є підвищення швидкості руху поїздів, що суттєво залежить від покращення якості ведення колійного господарства. Одночасно, для колійного господарства стратегічним напрямком є впровадження ресурсозберігаючих інноваційних технологій утримання залізничної колії з метою досягнення найбільшого економічного ефекту від їх впровадження, з дотриманням норм безпеки руху поїздів при підвищенні швидкості руху. Реалізація цієї мети можлива за рахунок розробки рекомендацій та технології щодо утримання залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5. На сьогоднішній день елементи скріплення типу КПП-5 згідно нормативно-технічної документації ремонту не підлягають і замінюються на нові.

Існує проблема, що пов'язана з відсутністю методики та технології контролю за роботою вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5, а саме, контроль за роботою окремих його елементів, так як вони визначають надійність роботи вузла скріплення в цілому. Приведені вище твердження вказують на актуальність даної тематики дисертаційної роботи, яка може покращити принципи ведення колійного господарства за рахунок обґрунтування і розробки технології контролю та утримання залізничної колії із використанням скріплення типу КПП-5. Це дозволило б підсилити роботу вузла скріплення з одночасним збереженням працездатності вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 протягом всього міжремонтного терміну експлуатації залізничної колії.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Обраний напрямок досліджень, які були розроблені у межах дисертаційної роботи, був застосований при виконанні науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, що виконувались за завданням Головного управління колійного господарства Укрзалізниці. Дисертант був відповідальним виконавцем і співавтором документів і звітів нижче наведених науково-дослідних робіт:

- «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного та високошвидкісного руху поїздів в Україні (№ДР 0114U002549)»;

- «Розробка пристрою для контролю сили притискання рейки до підрейкової основи у випадку застосування скріплення типу КПП-5 та регулювання сили притискання клеми КП-5 при втраті пружності. Дослідження з метою розробки рекомендацій щодо утримання колії в залежності від сили притискання рейки до підрейкової основи при використанні скріплення типу КПП-5 (№ДР 0113U002079)».

**Мета і задачі досліджень.** Метою даної дисертаційної роботи є розробка технології контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5 за рахунок дослідження силової роботи вузла скріплення в процесі експлуатації колії у відповідності критеріям безпеки руху, та впливу на колію рухомого складу.

#### **Задачі досліджень:**

1. Виконано аналіз розвитку досліджень роботи проміжних скріплень для залізобетонних шпал, в тому числі і скріплення типу КПП-5, та визначено шляхи покращення їх експлуатаційного ресурсу.

2. Для обґрунтування напруженого стану пружних клем типу КП-5 виконано дослідження моделювання залізничної колії із використанням метода кінцевих елементів, в якому враховано особливості взаємодії рейок та

підрейкових опор зі скріпленням типу КПП-5 при зовнішньому впливі рухомого складу.

3. Виконано експериментальні дослідження роботи залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5 для оцінки напруженого стану пружних клем типу КП-5 з метою перевірки адекватності математичної моделі реальним умовам експлуатації.

4. Розроблено методику та практичні засоби контролю за станом роботи пружних елементів рейкового скріплення типу КПП-5.

5. Досліджено та обґрунтовано оцінку стану пружних і залишкових деформацій у елементах рейкового скріплення типу КПП-5 та їх вплив на силову роботу вузла скріплення під час експлуатації.

6. З допомогою розробленої методики і практичних засобів розроблено та обґрунтовано технологію контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5; визначено економічну ефективність від її впровадження.

**Об'єкт досліджень** – процес силового взаємозв'язку у вузлі скріплення типу КПП-5 як закономірність між пружними і залишковими деформаціями у його елементах.

**Предмет досліджень** – проміжні рейкові скріплення залізничної колії.

**Методи досліджень.** У дисертаційній роботі використано комплексний метод досліджень, який враховує теоретичну і експериментальну частини. Для теоретичних досліджень застосовували метод математичного моделювання на основі використання метода кінцевих елементів (МКЕ), а також методи математичної статистики для обробки результатів експлуатаційних досліджень та експериментальних випробувань роботи залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5. Усі теоретичні дослідження виконували за допомогою ПЕОМ у операційній системі Windows на базі програмного забезпечення. Математичне моделювання взаємодії колії та рухомого складу виконувались у програмних комплексах ANSYS, та

NASTRAN. Обробку експериментальних даних проводили у програмних комплексах ANSYS, та NASTRAN.

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

1. Отримала подальший розвиток математична модель залізничної колії із врахуванням проміжного скріплення типу КПП-5, яка на відміну від існуючих враховує кінематичні та силові взаємозв'язки між елементами скріплення, що дозволяє визначити напружений стан найбільш напруженого елемента – клеми у вузлі скріплення типу КПП-5.

2. Вперше встановлені закономірності напруженого стану пружних клем скріплення типу КПП-5, що дозволило більш достовірно дослідити напружений стан пружних клем у вузлі скріплення одночасно по внутрішній та зовнішній стороні рейкової нитки.

3. Одержана невідома раніше математична залежність зміни сили притискання рейки до підрейкової основи при скріпленні типу КПП-5 в процесі експлуатації, яка дозволяє враховувати важливу складову величини інтенсивності зниження сили притискання і монтажною сили притискання, а також робить можливим оцінки зміни сили притискання рейки до підрейкової основи при різних пропущених тоннажах.

4. Вперше запропоновано та використано методику, яка дозволила більш повно, в порівнянні із діючими, використовувати експлуатаційні ресурси елементів скріплення типу КПП-5 за рахунок своєчасного контролю та підсилення силової роботи вузла скріплення під час експлуатації в колії. На основі даної методики розроблено технологію контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що отримані в роботі наукові положення та результати являються базою для вирішення важливої задачі – розробка технології контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5.

Розроблені та обґрунтовані наукові результати дозволяють підвищити ефективність експлуатації залізничної колії із скріпленням типу КПП-5, що є важливим у сучасних умовах ринкової економіки, а саме в даній дисертації.

1. Запропонована методика контролю за станом роботи пружних елементів скріплення типу КПП-5 дозволила розробити конструкцію колійного пристрою, призначеного для визначення пружності та сили притискання клеми при скріпленні типу КПП-5, який прийнято до попереднього використання у вигляді акту впровадження «Розробка пристрою для контролю сили притискання рейки до підрейкової основи у випадку використання скріплення типу КПП-5» в колійному господарстві Придніпровської залізниці. Із появою даної конструкції пристрою появляється можливість встановити контроль за силовою роботою вузла скріплення типу КПП-5 під час експлуатації колії.

2. Із використанням запропонованої методики та розробленої конструкції колійного пристрою було визначено допустиме мінімальне значення сили притискання, при якій стабільно буде притискатись рейка до підрейкової основи із одночасним збереженням оптимальної величини опору поздовжньому переміщенню рейкової нитки.

3. Отримані в дисертації результати силової роботи вузла скріплення типу КПП-5 дозволили розробити технологію контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5. Розроблена технологія базується на проведенні контролю та своєчасного підсилення силової роботи вузла скріплення типу КПП-5 у вказані терміни експлуатації колії.

Отримані в дисертації висновки та рекомендації щодо технології контролю та утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5 використовуються у навчальному процесі при підвищенні кваліфікації фахівців колійного господарства Укрзалізниці в навчально-науково-методичному центрі післядипломної освіти Дніпропетровського

національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Особистий внесок здобувача.** Автор спільно з науковим керівником сформулював мету, задачі досліджень, а також обговорював отримані результати. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: у роботі [102] – досліджено заходи щодо можливості укладання анкеризованих залізобетонних шпал у колію із вітчизняними проміжними рейковими скріпленнями типу КПП-5 та СКД65-б, з метою збільшення стійкості залізничної колії в повздовжній та поперечній площині; у [93] – приведені дослідження впливу різних факторів на силову роботу вузла скріплення типу КПП-5; у [106] – розроблена технологія контролю та утримання залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5; у [95] - удосконалено математичну модель роботи залізничної колії з проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 під дією рухомого складу для дослідження найбільш імовірних місць появи напруженого стану в елементах вузла скріплення; у [113] проаналізовано напружено-деформований стан колії із скріпленням типу КПП-5 для підтвердження адекватності математичної моделі та визначення місць встановлення вимірювальних датчиків за результатами математичного моделювання взаємодії колії та рухомого складу; у [103] - розглянуто та обґрунтовано можливості укладання конструкції безстикової колії у кривих, радіусом менше 300 м, із використанням сучасних видів скріплення; у [98] - проведено дослідження нормативів улаштування колії на інтенсивність бічного зношення головки рейки в кривих ділянках досліджено вплив різних параметрів улаштування колії на інтенсивність бічного зношення головки рейки в кривих ділянках, з одночасним зменшенням величини сили притискання рейки до підрейкової основи при скріпленні типу КБ та КПП-5; у [115] – досліджено заходи щодо удосконалення конструкції колії при застосуванні шурупно-дюбельного

кріплення для скріплень типу КБ та СКД, з одночасним зменшенням елементів у вузлі скріплення в порівнянні з нероздільним скріпленням типу КПП-5; у [104] - досліджено техніко-економічне порівняння можливості укладання конструкції безстикової колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5; у [83] – моделювання взаємодії залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 та КБ та рухомого складу в горизонтальній площині; у [119] - досліджено напружено-деформований стан в елементах проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 при повторно змінних циклах навантаження; у [100] - розробка пристрою для розрядки температурних напружень у плітях безстикової колії; у [92] - розробка конструкції пристрою для контролю сили притискання клеми типу до рейки в проміжному рейковому скріпленні, проведення полігонних досліджень з метою визначення пружних характеристик та її силової роботи при експлуатації; у [96] - досліджено вплив множини факторів на величину сили притискання рейки до підрейкової основи у випадку використання проміжного рейкового скріплення типу КПП-5; у [105] – отримано патент на корисну модель, з метою покращення роботи вузла проміжного рейкового кріплення типу КБ та СКД при експлуатації; у [117] - розроблено патент на корисну модель, з метою зміцнення конструкції залізничної колії в повздовжній та горизонтальних площинах при використанні анкеризованих шпал.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації докладалися та обговорювалися на Міжнародних наукових конференціях: «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», присвяченій 150-річчю заснування українських залізниць, 10-річчю вітчизняного пасажирського вагонобудівництва (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, травень 2011 р.); «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, вересень 2013 р.); «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, квітень 2014

р.); «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, травень 2015 р); у повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на між кафедральному семінарі кафедр «Колія та колійне господарство», «Проектування та будівництво доріг» та «Колієвипробувальної науково-дослідної галузевої лабораторії» (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, березень 2015 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 16 наукових працях, у тому числі: 7 статей – у фахових виданнях, затверджених МОН України та включених до міжнародної наукометричної бази "Index Copernicus" [93, 106, 95, 113, 98, 115, 104]; 2 статті - у закордонному фаховому виданні [102, 103]; 5 робіт є тезами наукових міжнародних конференцій [83, 119, 100, 92, 96], 2 роботи – пройшли стадію патентування та зареєстровані в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі [105-117].

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

Повний обсяг складає 250 сторінок друкованого тексту, у тому числі: 130 рисунків викладено на 78 сторінках, 59 таблиць на 70 сторінках, список літератури з 120 найменувань займає 16 сторінок, та чотири додатки викладено на 78 сторінках.