

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

**ТОКАРЄВ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**



УДК 625.151.2:625.033.34/.36

**УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВІВ УТРИМАННЯ  
ТА КОНСТРУКЦІЇ СТІЛОЧНИХ З'ЇЗДІВ**

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія  
Галузь знань 27 – транспорт

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

Дніпро – 2021

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

**Наукові керівники:** доктор технічних наук, професор  
**РИБКІН Віктор Васильович**,  
Дніпровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
завідувач кафедри «Колія та колійне господарство»;

кандидат технічних наук, доцент  
**ПАТЛАСОВ Олександр Михайлович**,  
Дніпровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
директор Навчально-наукового центру розвитку  
професійної освіти.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ШИРІН Леонід Никифорович**,  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка», завідувач кафедри  
транспортних систем і технологій, м. Дніпро;

кандидат технічних наук, доцент  
**КОВАЛЬОВ Вячеслав Вікторович**,  
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,  
доцент кафедри інженерної геології і геотехніки, м. Дніпро.

Захист відбудеться «11» березня 2021 року о 14<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна або на сайті за посиланням <http://ndch.diit.edu.ua/> (Аспірантура і докторантура – Захисти у раді Д08.820.01).

Автореферат розіслано «5» лютого 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д-р техн. наук, професор



А. М. Муха

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Залізничний транспорт, як в Україні, так і в більшості країн світу, забезпечує сталий розвиток і функціонування економіки. Значна частина пасажиро- і вантажообігу країни припадає саме на залізничний транспорт. Завдяки розгалуженій мережі задовольняються потреби в пасажирських перевезеннях і суспільного виробництва у внутрішньо- та у зовнішньодержавному сполученні.

Безперебійну роботу транспортної системи забезпечує її інфраструктура, основною частиною якої є залізнична колія як комплекс інженерних споруд. Залізнична колія постійно знаходиться під впливом кліматичних умов та рухомого складу і повинна виконувати всі покладені на неї функції постійно та безперебійно. Саме від стану колійної інфраструктури залежить допустима швидкість та безпека руху поїздів, пропускна і провізна спроможність, ефективне використання рухомого складу.

Ключовою складовою залізничної колії є спеціальні конструкції – стрілочні з'їзди, які забезпечують перевід залізничного рухомого складу з однієї сусідньої колії на іншу.

Аналіз матеріалів розслідувань причин сходів як пасажирського, так і вантажного рухомого складу з рейок на стрілочних з'їздах спонукав фахівців колійного господарства до введення методики контролю положення стрілочних з'їздів у плані по відстані між центрами стрілочних переводів, з огляду на те, що застосування загальноприйнятого методу стріл є неможливим. Запропонована методика не дозволяє контролювати поперечне зміщення стрілочного переводу та поворот його навколо центру, а також не існує можливості зіставити фактично виміряну відстань між центрами з проектною – до 2012 р. проекти на переукладання стрілочних з'їздів не розроблялись в повному обсязі. Крім того, що найголовніше, відстань між центрами стрілочних переводів та її порушення не дає можливості встановити допустиму швидкість руху поїздів.

На стрілочних з'їздах крім відсутності достатньо обґрунтованих нормативів утримання існує проблема конструкції, сутність якої полягає в такому: бруси захрестовинного блоку стрілочного переводу мають типову форму та довжину. В той самий час стрілочні переводи укладаються в нестандартні умови – всі міжколійя та форма з'їздів відрізняються. У результаті цього відбувається накладання брусів та шпал один на одного. Для того, щоб захрестовинні блоки укласти, працівники колійного господарства вимушені порушувати епюру брусів, що неухильно призводить до появи надмірних напружень в елементах верхньої будови колії та передчасних їх розладів.

Таким чином, наукове завдання удосконалення нормативів утримання та конструкції стрілочних з'їздів є актуальним, і саме його вирішенню присвячена дана робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174-р. Обраний напрямок досліджень пов'язаний з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Основні НДР, у яких здобувач був відповідальним співвиконавцем:

- «Проведення досліджень відступів між центрами стрілочних переводів та розробка нормативів при експлуатації» (ДР № 0114U002416);

- «Розробка технічних умов на укладання з'їзду на залізобетонних брусах у міжколіїному просторі розміром 4,8 м з використанням стрілочних переводів типу Р65 марки 1/11 проекту 1740.00.000;(01)» (ДР № 0116U006845).

**Мета і задачі досліджень.** Метою даної роботи є удосконалення нормативів утримання та конструкції стрілочних з'їздів, що дозволить встановити допустиму швидкість та підвищити безпеку руху поїздів на стрілочних з'їздах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *задачі*:

1. Встановити основні тенденції розвитку конструкції стрілочних з'їздів та існуючих нормативів їх утримання, а також проаналізувати проведені раніше дослідження з питань взаємодії у межах з'їзду залізничної колії та рухомого складу.

2. Розробити методику оцінки та дослідити реальний геометричний стан стрілочних з'їздів на залізницях України.

3. Удосконалити математичну модель динамічної взаємодії рухомого складу та колії у межах стрілочного з'їзду з урахуванням геометричних та механічних особливостей даної конструкції.

4. Провести експериментальні дослідження на стрілочному з'їзді для якісної та кількісної верифікації удосконаленої математичної моделі з метою її подальшого застосування у теоретичних розрахунках.

5. Удосконалити нормативи утримання стрілочних з'їздів у плані та поздовжньому профілі.

6. Дослідити питання впливу порушення епюри укладання брусів на процес збільшення деформацій колії в захрестовинній частині стрілочних переводів.

7. Розглянути питання взаємного впливу геометричних параметрів з'їзду на вибір методики його розрахунку.

**Об'єкт дослідження** – процес взаємодії у межах з'їзду залізничної колії та рухомого складу.

**Предмет дослідження** – нерівності залізничної колії на стрілочному з'їзді.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач у роботі використано: *методи аналітичної механіки та теорії пружності* – для формування диференціальних рівнянь динамічної взаємодії у межах з'їзду колії та рухомого складу; *методи обчислювальної математики* – для чисельного інтегрування системи нелінійних диференціальних рівнянь та апроксимації вимірних значень геометричного положення стрілочних з'їздів; *експериментальні методи з використанням тензометричних датчиків та апаратури з аналого-цифровим перетворенням електричних сигналів* – для визначення динамічних показників напружено-деформованого стану залізничної колії у межах з'їздів під дією рухомого складу; *методи теорії ймовірностей і математичної статистики* – для обробки та аналізу результатів вимірювань геометричного стану стрілочних з'їздів, а також проведених експериментальних досліджень; *методи функційного програмування* – для практичної реалізації математичної моделі взаємодії колії та рухомого складу.

Теоретичні дослідження та статистична обробка даних виконані з використанням пакету прикладних математичних програм з відкритим середовищем для інженерних та наукових розрахунків Scilab та відкритого пакету офісних додатків OpenOffice на базі ПЕОМ.

***Наукова новизна отриманих результатів.***

*Вперше:*

1) встановлено залежність між експлуатаційною швидкістю руху поїздів по з'їзду та нерівностями у плані, що визначаються шляхом вимірювання ординат від базисної лінії.

*Удосконалено:*

2) багатомасову нелінійну математичну модель динамічної взаємодії рухомого складу та колії на стрілочних з'їздах, що одночасно враховує конструктивні та механічні особливості екіпажу та колії. Запропонований підхід дозволив більш точно дослідити характер силового впливу рухомого складу на колію, що було підтверджено якісним та кількісним збігом результатів експериментальних та теоретичних досліджень;

3) методику розрахунку допустимої швидкості руху для звичайних та криволінійних стрілочних переводів, яка враховує наявність горизонтальних нерівностей та дозволяє надати рекомендації щодо подальшої експлуатації даних ділянок колії.

*Набула подальшого розвитку:*

4) методика розрахунку з'їздів, що доповнена перевіркою перетинання торців брусів бокового та прямих напрямків. Запропоновані доповнення надають можливість на етапі проектування визначити максимальну довжину брусів, що розміщуються без порушень епюри, і дозволяє зменшити витрати, пов'язані з транспортуванням та укладанням.

***Практичне значення отриманих результатів*** полягає в тому, що отримані в роботі наукові положення та результати дозволяють вирішити важливу науково-практичну задачу колійного господарства – підвищення безпеки руху поїздів у межах стрілочних з'їздів шляхом удосконалення нормативів їх утримання та конструкції. Нові підходи та пропозиції використані під час розробки нормативного документа АТ «Укрзалізниця», а саме «Методика контролю положення стрілочного з'їзду у плані» (СТП 06-001:2015).

Отримані в роботі результати експериментальних досліджень були використані під час розробки технічних умов на укладання стрілочного з'їзду в рамках виконання науково-дослідної роботи «Розробка технічних умов на укладання з'їзду на залізобетонних брусах у міжколіїному просторі розміром 4,8 м з використанням стрілочних переводів типу Р65 марки 1/11 проекту 1740.00.000;(01)» (ДР № 0116U006845) на замовлення ТОВ «ТрансІнвестСервіс».

Більшість викладених у дисертації теоретичних положень та практичних рекомендацій впроваджено в навчальний процес під час викладання дисциплін «Залізнична колія» та «Конструкції стрілочних переводів в особливих умовах» при підготовці бакалаврів та магістрів спеціальності 273 «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство», а також під час підвищення

кваліфікації фахівців колійного господарства в Навчально-науковому центрі розвитку професійної освіти Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, що підтверджується актами про впровадження результатів дисертації.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка мети та задач дослідження виконані спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень, що викладені в дисертаційній роботі, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: [6] – аналіз проведених раніше досліджень вітчизняними та закордонними вченими з питань взаємодії колії та рухомого складу в прямих та на стрілочних переводах; [4] – проаналізовано методики оцінки стану як стрілочного з'їзду, так і коротких кривих у плані та запропоновано алгоритм перетворення ординат, вимірних від базисної лінії до стріл вигину; [7] – запропоновано методику встановлення допустимої швидкості руху в межах з'їзду за результатами вимірювання ординат; [12] – статистична обробка результатів вимірювання положення стрілочних з'їздів у плані на залізницях України; [10] – обґрунтовано особливості, які необхідно врахувати для удосконалення математичної моделі взаємодії колії на стрілочних з'їздах та рухомого складу; [1, 8] – організація та проведення експериментальних досліджень, а також статистична обробка та оцінка напружено-деформованого стану колії у межах з'їзду з метою подальшого підтвердження адекватності удосконаленої математичної моделі; [9] – проведення теоретичних досліджень з метою визначення найбільш несприятливих співвідношень та величин локальних та регулярних геометричних нерівностей рейок на з'їздах; [3] – сформульовано основні критерії, які впливають на встановлення допустимої швидкості руху поїздів уздовж стрілочних переводів та пересічень колії, а також запропоновано методику визначення допустимої швидкості руху за критерієм допустимих прискорень та зміни непогашених прискорень з використанням вимірних ординат від базисної лінії; [11, 13] – описано пропозиції щодо використання залізобетонної конструкції підрейкової основи на стрілочних з'їздах; [2] – запропонована конструкція збірної дерев'яного бруса з обґрунтуванням геометричних розмірів елементів з'єднання та проведення відповідних теоретичних розрахунків; [5] – доповнення методики розрахунку з'їздів перевіркою максимально-можливої довжини брусів, які можна розташувати в межах захрестовинних блоків стрілочного з'їзду без порушення епюри укладання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертації доповідались та обговорювались на таких заходах:

Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана (Дніпропетровськ, 2013); 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2015); XIV Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение» (Дніпропетровськ, 2016); VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми

надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2017).

Дисертація в повному обсязі доповідалась на науковому семінарі кафедри «Колія та колійне господарство», міжкафедральному науковому семінарі кафедр «Колія та колійне господарство», «Проектування і будівництво доріг», «Мости та тунелі», «Безпека життєдіяльності» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпро, 2020).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладено у 13 наукових працях і матеріалах конференцій: 7 основних праць, з них: 4 – статті, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus і є фаховими [1-4], 2 – статті у фахових виданнях [5-6]; і 7 додаткових, з них: 1 – нормативний документ АТ «Укрзалізниця» [7], 5 – тези доповідей та матеріали конференцій [8-12], 1 – патент на корисну модель [13].

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг становить 248 сторінок, з них 107 рисунків за текстом (19 з яких розташовано на окремих сторінках), 27 таблиць за текстом (16 з яких розташовані на окремих сторінках), список використаних джерел із 142 найменувань подано на 15 сторінках, 14 додатків на 57 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й задачі досліджень, їх зв'язок з науково-дослідними роботами. Викладено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію та публікації матеріалів досліджень.

**У першому розділі** проведено аналіз: теоретично можливих схем укладання двох стрілочних переводів у з'їзд; розвитку конструкції підрейкової залізобетонної основи (як складової частини конструкції стрілочних з'їздів); теоретико-експериментальних досліджень проблем динаміки взаємодії в системі «колія-екіпаж» на стрілочних переводах, прямих та кривих ділянок (аналогів з'єднувальної частини стрілочного з'їзду) та розробки нормативів утримання; матеріалів розслідувань появ інцидентів в зоні стрілочних з'їздів. Сформульовано постановку задач дослідження.

Базовими задачами та проблемами для переважної більшості напрямків досліджень у галузі залізничного транспорту є моделювання взаємодії колії та рухомого складу. В першу чергу слід відмітити значний внесок вчених у розвиток досліджень динаміки рухомого складу та його впливу на колію: П. С. Анісімов, Є. П. Блохін, М. Ф. Веріго, С. В. Вершинський, Л. О. Грачева, В. Н. Данілов, В. Д. Данович, Ю. В. Дьомін, М. Л. Коротенко, В. А. Лазарян, А. А. Львов, С. В. Мямлін, Г. І. Петров, М. О. Радченко, Ю. С. Ромен, М. М. Соколов, В. Ф. Ушкалов, В. Д. Хусідов, V. Bommel, F. Carter, A. De Pater, V. Dukkupati, V. Garg, A. Gilchrist, A. Hobbs, S. Iwnicki, J. Kalker, C. Keizer, K. Knothe, T. Matsudaira, T. Muller,

A. Shabana, H. Sugiyama, G. Uebelacker, H. Weber, A. Wickens, K. Zaazaа та ін. Дослідження роботи колії під впливом рухомого складу в прямих та кривих ділянках, а також в зоні з'єднань та пересічень колій – окремий фундаментальний напрямок розвитку питань роботи системи «колія-екіпаж». Дослідження проблем динаміки та (або) конструкції колії, нормативів її улаштування та утримання, пов'язані з іменами вчених: В. Г. Альбрехт, С. В. Амелін, І. О. Бондаренко, Є. М. Бромберг, В. Г. Вербицький, Ю. Д. Волошко, Е. І. Даніленко, Б. Е. Глюзберг, В. П. Гнатенко, Є. П. Єршков, Г. Г. Желнін, Г. К. Жилін, П. В. Ковтун, О. Я. Коган, Д. М. Курган, М. Б. Курган, К. В. Мойсеєнко, А. М. Орловський, О. М. Патласов, В. О. Певзнер, В. В. Рибкін, А. П. Татуревич, М. А. Фрішман, Н. В. Халіпова, В. В. Циганенко, Г. М. Шахунянц, В. Ф. Яковлев, A. de Man, S. J. Cox, S. Grassie, C. Esveld, K. Johnson, G. Hunt, G. Kaess, V. Markine, B. Lichtberger, K. Riessberger, M. Roney, Y. Sato, R. Schweitzer, A. Suiker, D. Thompson, H. Tjaden, J. Tunna, M. Van, J. Zand, H. Zimmermann та ін.

На стрілочних з'їздах, які укладаються при невеликому міжколійї, існує проблема накладання брусів та шпал в захрестовинній частині. На закордонних залізницях дана проблема вирішується шляхом розробки індивідуального проекту укладання з застосуванням різних конструктивних рішень. Аналіз сучасних конструкцій стрілочних з'їздів як на вітчизняних, так і на закордонних залізницях, показав нову тенденцію розвитку підрейкової основи – застосування збірних брусів. Даний підхід розширює межі використання залізобетонних опор в якості підрейкової основи. Але згадані конструктивні рішення позбавлені універсальності: для кожного міжколійя потрібно розробляти окремий індивідуальний комплект брусів.

Аналіз багаторічного досвіду проведення різних напрямків теоретичних та експериментальних досліджень з питань оцінки динамічної взаємодії колії та рухомого складу як в зоні стрілочних переводів, так і в межах прямих та кривих ділянок засвідчив необхідність деталізації та врахування конструктивних, механічних та геометричних властивостей як конструкції колії (наприклад, параметрична зміна жорсткості та маси металевої частини при взаємодії; імпульсна зміна кривизни колії тощо), так і екіпажу (наприклад, зазори в ковзунах; поява відновлювального моменту при боковому хитанні кузова, виникнення моментів сил «сухого» тертя між тілами, тощо). Крім того, існуючий норматив укладання та утримання з'їздів розроблений без можливості оцінки нерівностей колії. Врахування вищевказаних особливостей надасть змогу більш адекватно відобразити характер взаємодії в системі «колія-екіпаж» та детально досліджувати вплив різних параметрів та співвідношень геометричних та (або) силових нерівностей.

Аналіз причин появ інцидентів у межах стрілочних з'їздів показав, що значна частина сходів рухомого складу обумовлена в основному станом колії у плані ( $\approx 34\%$ ) та у поздовжньому профілі ( $\approx 19\%$ ). Таким чином, приведені результати свідчать про необхідність у першу чергу проведення досліджень впливу стану колії за напрямком у плані та поздовжньому профілі на безпеку руху.



Базуючись на результатах аналізу існуючих нормативних вимог, сучасного стану розвитку конструкції стрілочних з'їздів, досліджень з питань динаміки взаємодії в системі «колія-екіпаж» та матеріалів розслідувань причин появ інцидентів у межах стрілочних з'їздів, сформульовано наукову задачу даних досліджень та запропоновано основні напрямки її вирішення.

У *другому розділі* розроблено методику оцінки положення стрілочних з'їздів у плані та визначено їх реальний стан на залізницях України; обґрунтовано аналітичні залежності, що дозволяють встановлювати допустиму швидкість руху поїздів на криволінійних стрілочних переводах та на боковий напрямок звичайних стрілочних переводів за критерієм комфортабельності їзди.

За результатами порівняльного аналізу різних методів вимірювання геометричного положення з'їздів у плані запропоновано оцінювати положення з'єднувальної частини з'їзду за ординатами  $F_i$ , що виміряні від базисної лінії, яка знаходиться на певній відстані від робочої грані рейки (рис. 1) таким чином, щоб забезпечувалась умова  $F_{i \min} > 0$ .

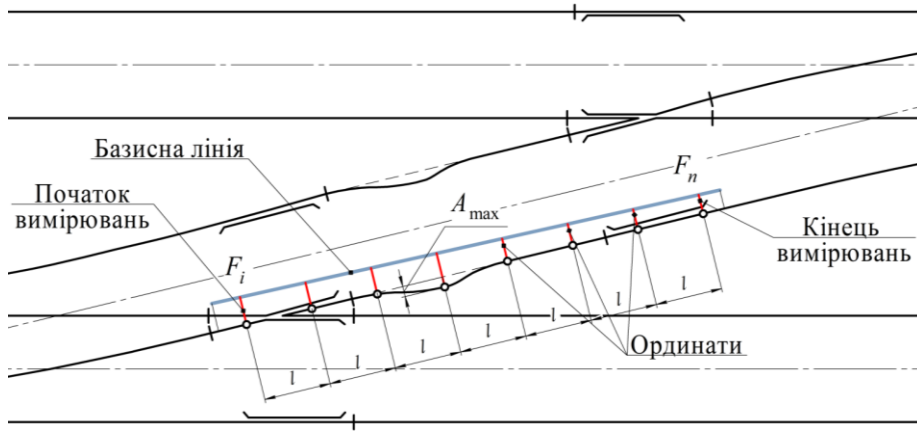


Рис. 1. Методика вимірювання ординат від базисної лінії

Загальноприйнятою практикою визначення стану криволінійних ділянок у світі при експлуатації є оцінка різниці у суміжних стрілах вигину  $\Delta f$ , що виміряні від хорди певної довжини. Для трансформації вимірних ординат  $F_i$  до стріл вигину  $f_i$ , автором отримано відповідну залежність (1). Різниця у суміжних стрі-

лах вигину  $\Delta f$  при цьому буде мати вигляд (2).

$$f_i = F_i - \frac{1}{2}(F_{i+1} + F_{i-1}) \quad (1)$$

$$\Delta f = \frac{1}{2}[F_{i-1} - 3(F_{i+1} - F_i) - F_{i+2}] \quad (2)$$

зміни  $[\psi]$  у суміжних точках. Визначаються вказані швидкості руху за формулами (3) та (4) відповідно.

Основною метою проведення експлуатаційних досліджень було встановлення за вищезгаданою методикою стану і, відповідно, визначення умов експлуатації стрілочних з'їздів. Багаторічний досвід проведення різних типів

Для звичайних та криволінійних стрілочних переводів за допомогою методики переходу від ординат  $F_i$  до стріл вигину  $f_i$  отримано аналітичні залежності швидкості руху поїздів від значень непогашених прискорень  $[\alpha_{\text{нп}}]$  та швидкості їх

$$V_{[\alpha_{\text{нп}}]} \leq 5a \sqrt{\frac{10[\alpha_{\text{нп}}]}{2F_i - (F_{i+1} + F_{i-1})}}, \quad (3)$$

$$V_{[\psi]} \leq 5 \sqrt[3]{\frac{2a^2[\psi]\Delta x}{F_{i-1} - 3(F_{i+1} - F_i) - F_{i+2}}}, \quad (4)$$

де  $a$  – довжина хорди, м;

$\Delta x$  – відстань між точками, м.

експлуатаційних досліджень свідчить про те, що очікувати найбільші відхилення від вимог нормативних документів, наприклад, за шириною колії або за напрямком у плані, слід на найбільш вантажонапружених ділянках. Тому для досліджень були обрані з'їзди, які в першу чергу знаходились на головних та приймально-відправних коліях.

Результати визначення умов експлуатації з'єднувальної частини з'їздів для різних міжколіїних відстаней представлено на рис. 2.

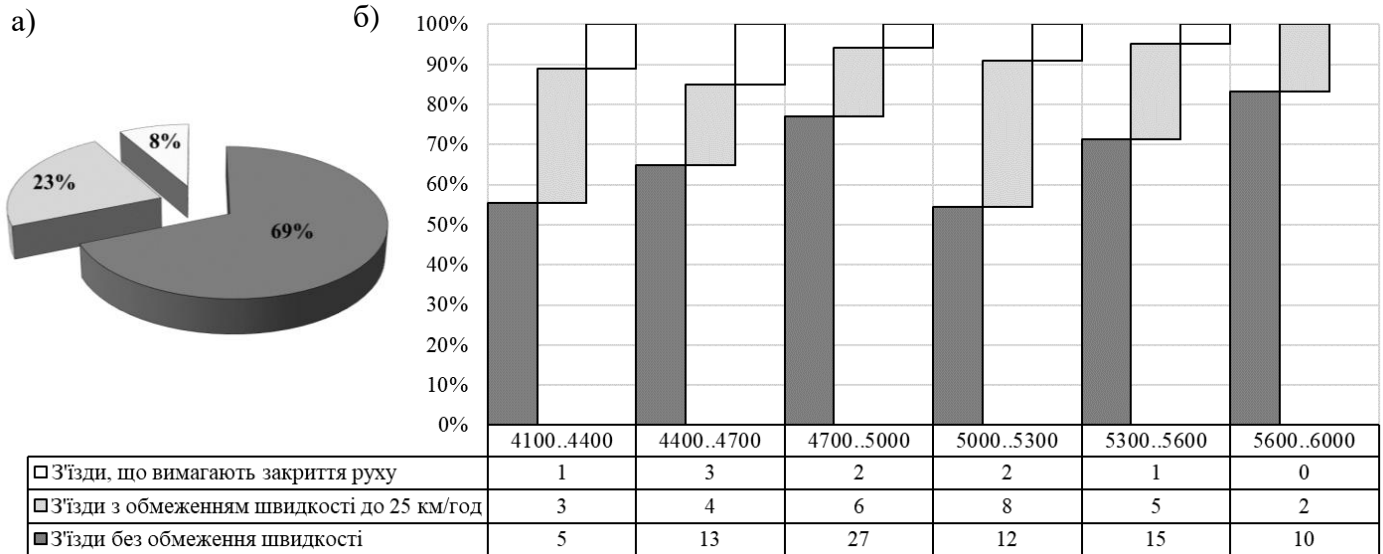


Рис. 2. Оцінка стану стрілочних з'їздів у плані:

а) – загальний розподіл за умовами експлуатації;

б) – процентне співвідношення для різного діапазону міжколіїних відстаней

Кореляційної залежності між появою обмежень швидкості та величиною міжколіїної відстані не встановлено. Практично в кожному діапазоні міжколіїя спостерігається поява з'їздів з обмеженням швидкості та закриттям руху в середньому на рівні 23% та 8% відповідно від загальної кількості (див. рис. 2, а).

Отримані результати досліджень засвідчують про наявність проблеми в утриманні стрілочних з'їздів у плані та про необхідність встановлення відповідностей між ступенями відступів й допустимою швидкістю руху. Спираючись на загальновідому практику проведення досліджень щодо оцінки впливу різних співвідношень горизонтальних і вертикальних нерівностей (відступів) колії, запропоновано провести теоретичні дослідження на базі математичного моделювання взаємодії в системі «колія-екіпаж».

У *третьому розділі* описана вдосконалена математична модель просторових коливань екіпажу та колії у межах стрілочних з'їздів.

Переважає більшість раніше розроблених математичних моделей динамічної взаємодії в системі «колія-екіпаж» значно спрощує представлення однієї частини системи в залежності задачі, що вирішується, та процес деталізації, як правило, зводиться або до складної багатомасової моделі вагона та спрощеної (ідеалізованої) моделі колії, де її маса зосереджена в одній точці (інколи як безінерційна складова), або навпаки,

моделювання складної структури верхньої будови колії, при цьому рухомий склад замінюється його частиною (наприклад, невідресореною масою) або вплив всього екіпажу розглядається як одиночна динамічна сила. Вказані спрощення рухомого складу в повній мірі не відображають характер коливань як відресореної, так невідресореної частин екіпажу (особливо якщо йде мова про дослідження впливу групи нерівностей).

Інструментом для проведення теоретичних досліджень обрано модель вантажного піввагона на візках 18-100, що є найбільш розповсюдженим типом рухомого складу на залізницях України. Запропоновано модель вагона розглядати як систему, що складається з 11 твердих тіл (кузов, дві надресорні балки, чотири бокові рами та чотири колісні пари), що поєднані між собою різного типу зв'язками (рис. 3, а-в), та рухається по пружно-дисипативній дискретній колії, яка під одним колесом представляє собою систему з 3 абсолютно твердих тіл – приведеної маси рейки або металеві частини стрілочних переводів, підрейкової основи та баластного шару (рис. 3, г). Сегментація колії на окремі складові дозволила врахувати параметричний характер зміни пружних та інерційних характеристик елементів верхньої будови колії. Таким чином, в роботі запропоновано одночасно враховувати більш детальну модель вагона та багатомасову модель колії, що в попередніх дослідженнях розглядалися, як правило, окремо.

Диференційні рівняння руху будь-якого тіла розрахункової схеми, складено за принципом Д'аламбера-Лагранжа у декартовій системі координат, і в загальному випадку мають вигляд:

$$M\ddot{q} + Q_{\Sigma} = 0. \quad (5)$$

При цьому у формулі (5) позначено:

$$M = \begin{bmatrix} m & & & & & & & \\ & m & & & & & & \\ & & m & & & & & \\ & & & I_z & & & & \\ & & & & I_y & & & \\ & & & & & & & I_x \end{bmatrix}, \quad \ddot{q} = [\ddot{z} \quad \ddot{y} \quad \ddot{x} \quad \ddot{\psi} \quad \ddot{\varphi} \quad \ddot{\theta}]^T, \quad Q_{\Sigma} = \left[ \sum_{i=1}^n F_{zi} \quad \sum_{i=1}^n F_{yi} \quad \sum_{i=1}^n F_{xi} \quad \sum_{i=1}^n M_{zi} \quad \sum_{i=1}^n M_{yi} \quad \sum_{i=1}^n M_{xi} \right]^T,$$

де  $m$ ,  $I$  – маса та головні момент інерції відповідних тіл;

$z$ ,  $y$ ,  $x$ ,  $\psi$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$  – лінійні та кутові переміщення тіла;

$F_{z(y, x)}$ ,  $M_{z(y, x)}$  – сили та моменти, що діють на тіло;

$n$  – кількість сил, прикладених до тіла.

Моменти сил  $M_{z(y, x)}$  визначаються за допомогою відповідних співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} M_z &= F_y L_{\varphi\psi} - F_x L_{\psi\theta} + M_z^{\text{top}} \\ M_y &= F_z L_{\varphi\psi} - F_x L_{\varphi\theta} + M_y^{\text{top}} \\ M_x &= F_z L_{\psi\theta} - F_y L_{\varphi\theta} + M_x^{\text{top}} \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} L_{\varphi\psi} &= l_x - l_z \varphi - l_y \psi \\ L_{\psi\theta} &= l_y + l_x \psi - l_z \theta \\ L_{\varphi\theta} &= l_z + l_x \varphi + l_y \theta \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де  $L_{\varphi\psi(\psi\theta, \varphi\theta)}$  – плечі сил, що змінюються в залежності від повороту тіла;

$M_{z(y,x)}^{\text{top}}$  – моменти (відновлювальні, сил сухого тертя та ін.), які діють на тіло відносно відповідних осей;

$l_{z(y,x)}$  – координати точки прикладання сили у системі координат, початок якої знаходиться у центрі маси тіла.

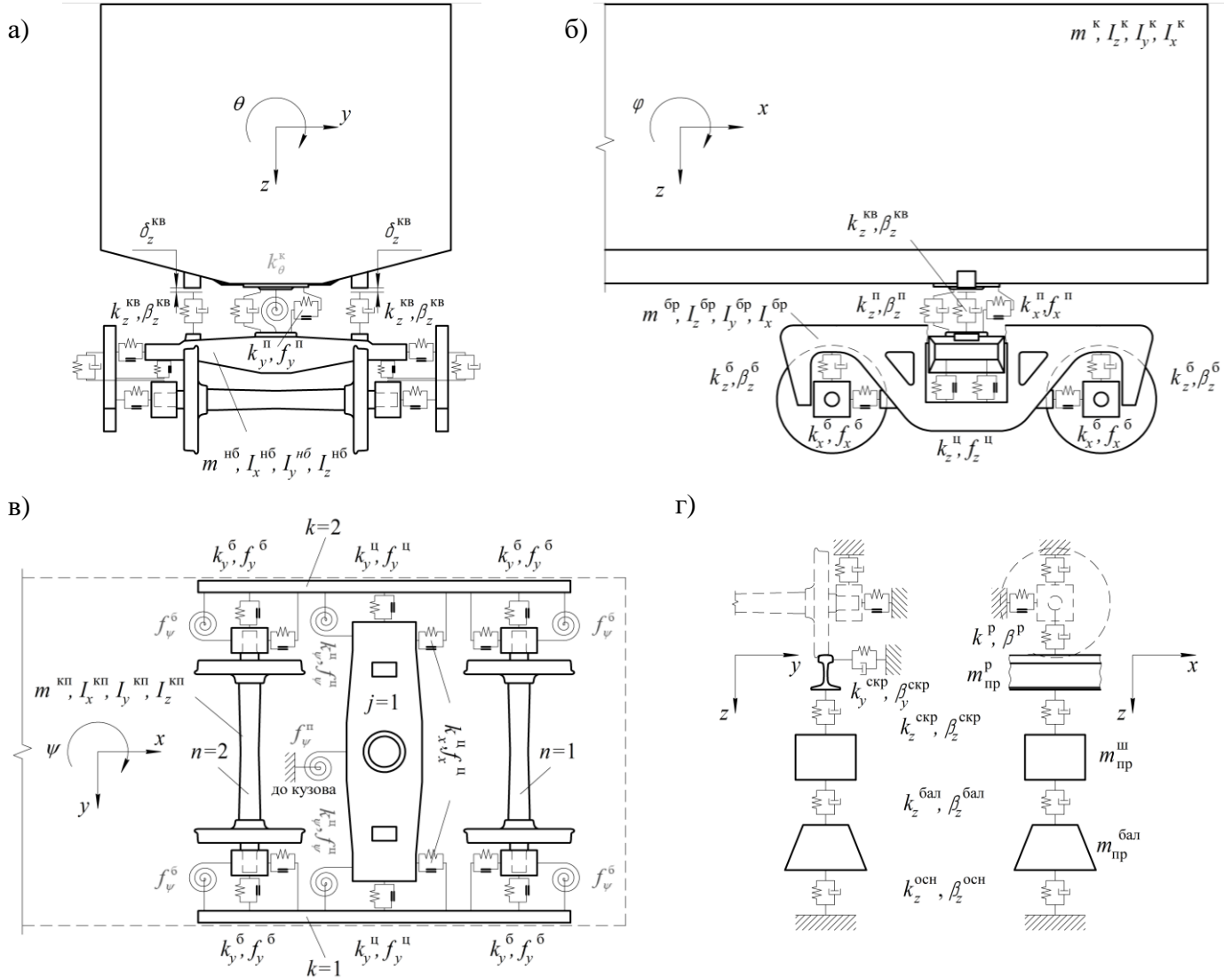


Рис. 3. Модель вантажного піввагона та колії:

а-в – вид спереду, збоку та зверху відповідно; г – колія під одним колесом

Тіла системи «колія-екіпаж» в моделі поєднані між собою різного типу зв'язками, величина реакції в яких залежить від характеристик безпосередньо самого зв'язку та взаємного відносного переміщення (швидкості) тіл.

Наприклад, пружно-в'язкий лінійний зв'язок математично описується як:

$$F_{\text{пв}} = k\Delta_q + \beta\dot{\Delta}_q, \quad \begin{cases} \Delta_q = q_2 - q_1 \\ \dot{\Delta}_q = \dot{q}_2 - \dot{q}_1 \end{cases}, \quad (7)$$

де  $k, \beta$  – жорсткість та коефіцієнт в'язкого тертя;

$\Delta_q, \dot{\Delta}_q$  – деформації та швидкість деформації зв'язку у відповідному напрямку;  
 $q_1(\dot{q}_1), q_2(\dot{q}_2)$  – переміщення (швидкість) точки прикладання реакції зв'язку першого та другого тіла відповідно.

Переміщення (швидкості) будь-яких точок тіла у трьох лінійних напрямках (вважаючи кутові переміщення (швидкості) при цьому малими) набувають вигляду:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_c \times \mathbf{E} + \mathbf{A} \times \mathbf{L}. \quad (8)$$

У формулі (8):

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= [z \quad y \quad x]^T, \\ \mathbf{q}_c &= [z_c \quad y_c \quad x_c]^T, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \theta & \varphi \\ -\theta & 0 & \psi \\ -\varphi & -\psi & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{L} &= [l_z \quad l_y \quad l_x]^T, \end{aligned}$$

де  $\mathbf{q}_c$  – переміщення центра ваги тіла;

$\mathbf{E}$  – вектор-рядок, розміром  $1 \times n$  ( $n$  – кількість сил, що прикладено до тіла);

$\mathbf{A}$  – матриця повороту.

Для практичної реалізації складної багатомасової системи в роботі використано парадигму функційного програмування, що дозволило окремі складові вирішення задачі об'єднати у блоки (процедури) та безпосередньо компонувати модель на базі таких структурних елементів. Даний підхід дозволяє достатньо легко реалізувати динамічну модель не тільки вантажних вагонів, а й інших типів рухомого складу в пакеті прикладних програм, наприклад, MATLAB або Scilab.

**У четвертому розділі** наведено результати експериментальної оцінки напружено-деформованого стану залізничної колії у межах стрілочного з'їзду на залізобетонних брусах: проведено статистичний аналіз вимірних напружень в кромках підошви рейок, вертикальних та бокових сил в залежності від швидкостей руху дослідного поїзда; перевірено адекватність удосконаленої математичної моделі динамічної взаємодії колії та вантажного вагона на візках 18-100 за результатами експериментальних досліджень.

Динаміко-міцнісні випробування проводились на дослідному стрілочному з'їзді, розташованому в межах під'їзних колій на території ТОВ «ТрансІнвестСервіс». Для проведення випробувань було сформовано дослідний поїзд, до складу якого входив маневровий тепловоз ТГМ6А та два навантажених чотиривісних піввагона на візках моделі 18-100.

Перед початком встановлення вимірювальних приладів проведено інструментальну перевірку стану колії у межах з'їзду з метою визначення ймовірних зон найбільш несприятливого впливу рухомого складу. Додатково проаналізовано план з'єднувальної частини за методикою, описаною у другому розділі. Остаточню місця розташування приладів обґрунтовано після експрес-аналізу результатів вимірювань динамічних прогинів елементів верхньої будови колії у попередньо-визначених перерізах при проходженні дослідного поїзда.

Значення показників напружено-деформованого стану, що отримані під час проведення експериментальних досліджень, розглядались як випадкові величини та вважалось, що вони підпорядковуються закону нормального розподілу. На першому етапі для кожної групи приладів значення показників об'єднувались у первинні вибірки за різними критеріями: напрямком руху; швидкістю руху; осями (направляючими чи ні) дослідного поїзда; місцем встановлення приладів. Перевірка нульової гіпотези первинних вибірок проводилась за допомогою критерія згоди Шапіро-Уїлка. На другому етапі аналізу результатів первинних вибірок визначалась можливість їх об'єднання в одну сукупність однорідних вибірок. Після цього для кожної вибірки встановлювались основні ключові статистики: середні, максимально-ймовірні (з рівнем ймовірності  $P = 0,994$ ) та максимально-спостережні значення, дисперсії тощо. При цьому коефіцієнт варіації склав: для вертикальних сил – 0,08..0,15, для напружень у кромках рейки – 0,12..0,23, для бокових сил – 0,11..0,32.

Після обробки даних проведено якісну та кількісну верифікацію отриманих значень за результатами експериментальних досліджень та моделювання. Розбіжність результатів склала 9–13%, що свідчить про адекватне відображення поведінки вагона під час проходження з'єднувальної частини стрілочного з'їзду.

**У п'ятому розділі** встановлено вплив стану з'єднувальної частини з'їзду у плані та поздовжньому профілі на умови динамічної взаємодії в системі «колія-екіпаж»; проведено дослідження щодо визначення допустимих відступів від норм утримання за критерієм впливу на колію та безпеки руху; встановлено співвідношення існуючих вимог для звичайної колії та отриманих за результатами моделювання; удосконалено нормативи утримання стрілочних з'їздів у плані та поздовжньому профілі.

Враховуючи спектр можливих комбінацій укладання стрілочних переводів у з'їзд встановлено найбільш несприятливу схему – скорочений з однаковими марками хрестовин (далі, розрахунковий). Результати моделювання засвідчили, що для вкорочених стрілочних з'їздів значення бокових сил у межах захрестовинної частини більші на 72,7–76,5% для скорочених з'їздів по відношенню до «еталонного» (звичайний з'їзд між паралельними коліями). Крім того, значення силового впливу вищі для з'їздів з різними марками хрестовини в середньому на 3–5% ніж при аналогічних умовах для з'їздів з однаковими марками. Паралельно досліджено вплив довжин прямих вставок в з'єднувальній частині з'їзду. Залежності між величиною динамічних сил та довжиною прямих вставок не виявлено. Так, при довжинах прямих вставок 6,25 та 12,5 м значення бокових сил відрізняються не більше ніж на 1,7–3,6%, вертикальних сил 2,5–4,3%.

Для розрахункової схеми з'їзду визначено значення допустимих відхилень від норм утримання, при яких необхідність обмеження швидкості руху поїздів відсутня. Розглянуто окремо поодинокі нерівності у вертикальній (осідання та перекося) та горизонтальній площинах, а також їх одночасне поєднання. Початкові значення амплітуд та довжин геометричних нерівностей для розрахунку прийняті з урахуванням існуючих нормативних вимог для звичайної колії, які регламентовані «Технічними вказівками щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання

рейкової колії» (ЦП/0267). Алгоритм розрахунку розділено на дві основні ітерації. На першому етапі визначаються межі діапазону амплітуд нерівностей, для яких:

$$\left. \begin{aligned} & (\exists a \in A) (|U_m - [U]| \leq \delta_U); U_m = f(a) \Leftrightarrow \{P, Y_6, K_{ст}\}; \\ & A = \{a_k\} \Leftrightarrow \forall k \in \mathbb{N}: a_i < a_{i+1}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $a$  – амплітуда нерівності;

$U_m, [U]$  – отримані в результаті моделювання та допустимі значення показників міцності й безпеки руху;

$\delta_U$  – допустима похибка для оцінки розрахункових показників;

$P, Y_6$  – вертикальна та бокова сила взаємодії рейки та колеса;

$K_{ст}$  – коефіцієнт запасу стійкості колеса проти вповзання на рейку.

На другому етапі за допомогою методу бінарного пошуку в межах інтервалу  $[a_{\min}; a_{\max}]$  встановлюється розрахункове значення амплітуди нерівності.

Отримані за вищевказаним алгоритмом розрахункові значення відступів у плані та поздовжньому профілі порівнювались з нормативними вимогами для звичайної колії. Наприклад, при швидкості  $V = 40$  км/год співвідношення розрахункових та допустимих амплітуд перекосів складає 1,075 (43 мм / 40 мм)<sup>1</sup>, а осідань – 1,057 (37 мм / 35 мм). В результаті було встановлено, що для поодиноких нерівностей існуючі вимоги до стану звичайної колії (табл. 1–3) можуть бути прийняті для оцінки нерівностей у межах стрілочного з'їзду.

Таблиця 1 – Вимоги щодо оцінки перекосів колії

Перекус, мм	Допустима швидкість, км/год
понад 30 до 40 включно	40
понад 40 до 50 включно	15
понад 50	рух закривається

Таблиця 2 – Вимоги щодо оцінки осідань колії

Осідання, мм	Допустима швидкість, км/год
понад 30 до 35 включно	40
понад 35 до 45 включно	15
понад 45	рух закривається

Таблиця 3 – Вимоги щодо оцінки колії за напрямком у плані

Різниця у стрілах вигину, виміряних через 10 м від середини хорди довжиною 20 м, мм	Допустима швидкість, км/год
понад 35 до 65 включно	40
понад 65 до 90 включно	15
понад 90	рух закривається

за напрямком у плані 35 мм) та допустимих значень для звичайної колії складає 0,8 (32 мм / 40 мм), а співвідношення осідань III ступеня (при аналогічних відступах у плані) – 0,828 (29 мм / 35 мм).

Поєднання вертикальних та горизонтальних нерівностей у межах з'їзду вимагає додаткового зменшення швидкості руху поїздів (табл. 4). Це обумовлено тим, що, наприклад, при швидкості  $V = 40$  км/год співвідношення розрахункових значень амплітуд перекосів III ступеня (при відступах

<sup>1</sup> Чисельник – для стрілочних з'їздів; знаменник – для звичайної колії.

Таблиця 4 – Допустима швидкість пропускання поїздів, км/год, з поєднанням відступів за напрямком у плані з перекосами та осіданнями

Вид відступу, його ступінь та значення	Відступ у плані довжиною до 10 м вкл.			
	III ступінь	IV ступінь	V ступінь (різниця стріл, мм)	
			понад 35 до 65 (включно)	понад 65 до 80 (включно)
Перекоси (до 10 м)				
III ступінь	-	40	25	Рух закривається
IV ступінь	-	25	15	
V ступінь:				
понад 20 до 30 мм включно	25	15	15	15
понад 30 до 40 мм включно	15	Рух закривається		
понад 40 до 45 мм включно	Рух закривається			
Осідання				
III ступінь	-	40	25	Рух закривається
IV ступінь	-	25	15	
V ступінь:				
понад 25 до 30 мм включно	25	15	15	Рух закривається
понад 30 до 35 мм включно	15	Рух закривається		
понад 35 до 40 мм включно	Рух закривається			

них з переміщенням підрейкової основи вздовж переводу, а також вилучення зайвих елементів верхньої будови колії.

Для оцінки впливу порушення (зміни) епюри укладання брусів на процес появи розладів колії застосовано кількісний критерій дії рухомого складу на колію – механічну роботу (А), що виконує діюча в заданому перерізі динамічна вертикальна сила. Такий підхід вперше було запропоновано в роботі д-ра техн. наук Д. М. Кургана та д-ра техн. наук І. О. Бондаренко. В даному дослідженні визначено саме вплив відстані між осями опор ( $l_i$ ) на швидкість поступового зростання деформацій колії. Значення вертикальної сили та динамічного прогину обчислювалось за відомою методикою розрахунку колії на міцність (ЦП-0117). Конструкція колії: рейки Р65, шпали залізобетонні, баласт щебеновий. Рухомий склад: пасажирські вагони на візках КВЗ-ЦНИИ та вантажні на візках ЦНИИ-ХЗ. Швидкість руху прийнята максимальною для бокового напрямку стрілочних переводів марки 1/11. Відстань між осями

У шостому розділі досліджено питання впливу порушення епюри укладання брусів на процес появи розладів колії в захрестовинній частині стрілочних переводів; запропоновано удосконалення конструкції стрілочних з'їздів за рахунок використання універсального комплексу збірних брусів.

Існуючі методики розрахунку стрілочних з'їздів базуються на параметрах безпосередньо самих переводів (практична довжина, марка тощо) та конкретних даних місця їх подальшого укладання (міжколійя, пряма вставка тощо). В той самий час конструктивні особливості стрілочних переводів, такі як різна довжина брусів, при укладанні можуть бути причиною порушення епюри в захрестовинній частині, що є наслідком накладання торців брусів та шпал. Указані порушення призводять до збільшення як людських, так і матеріальних витрат, пов'язаних з переміщенням підрейкової основи вздовж переводу, а також вилучення зайвих елементів верхньої будови колії.



підрейкових опор варіювалась від 425 до 775 мм (граничні значення отримані шляхом інструментальних вимірювань в захрестовинній частині реального з'їзду). Як і слід було очікувати, залежність роботи вертикальної сили від епюри носить лінійний характер. Так,  $A|_{l_i=425} = 4,04(12,36)$  кН·м,  $A|_{l_i=550} = 4,87(16,29)$  кН·м та  $A|_{l_i=775} = 6,41(24,22)$  кН·м (у дужках показано значення для вантажного вагона). Таким чином, збільшення відстані між осями підрейкових опор є прямим наслідком процесу зростання деформацій колії.

В роботі доповнено існуючу методику розрахунку з'їздів додатковим критерієм – порівняння довжин останнього бруса проекту стрілочного перевodu та теоретично отриманої для заданих умов проектування. Введення згаданого критерію дозволило встановити мінімальне значення міжколійя, в межах якого відсутня проблема накладання брусів та шпал. Розрахунки виконано для найбільш розповсюджених проектів стрілочних переводів, які експлуатуються на мережі залізниць України, а саме проекти 1740 та 2215. До уваги також приймалась наявність (відсутність) асиметрично вкорочених шпал (брусів) в захрестовинній частині переводів. Результати показали: при використанні стандартних шпал по прямому напрямку прилеглої колії без порушення епюри укладання бруси довжиною 5000 мм розміщуються тільки у випадку, якщо міжколійна відстань більше 5 м; застосування асиметрично вкорочених шпал дозволяє розміщувати повний комплект (включно з брусами довжиною 5000 мм) при міжколійній відстані більше 4,8 м. Таким чином, міжколійна відстань є основним геометричним параметром з'їзду, що безпосередньо впливає на методику його розрахунку – при значенні міжколійя менше 5 м доцільно також враховувати епюру розкладки брусів в захрестовинній частині.

В подальшому встановлено найбільш розповсюджену величину міжколійя на магістральних залізницях, де укладено з'їзди. Результати засвідчили домінування з'їздів при міжколійній відстані менше 4,7 м. Співвідношення найбільш розповсюдженого міжколійя та мінімально можливого з точки зору розміщення повного комплекту брусів підтверджує наявність проблеми порушення епюри в захрестовинній частині з'їздів на залізницях України.

Для розв'язання вищевказаної проблеми запропоновано використовувати збірну конструкцію підрейкової основи в захрестовинній частині, яка забезпечує одночасне спирання рейкових ниток бокового та прямих напрямків. Основною перевагою застосування принципу збірності є можливість дискретно трансформувати та підлаштувати підрейкову основу до необхідного міжколійя з кратним кроком, значення якого визначається зі співвідношення (10).

$$\Delta E = C \cdot \tan(1/N), \quad (10)$$

де  $N$  – марка хрестовини;

$C$  – відстань між осями брусів, мм.

На рис. 4 показано приклад переміщення блоку стрілочного з'їзду з міжколійя 4800 на 4755 мм (хрестовини марок 1/11, відстані між осями 520 мм). Так, зменшення міжколійної відстані на

один крок (45 мм), призводить до вилучення двох напівбрусів (рис. 4, б).

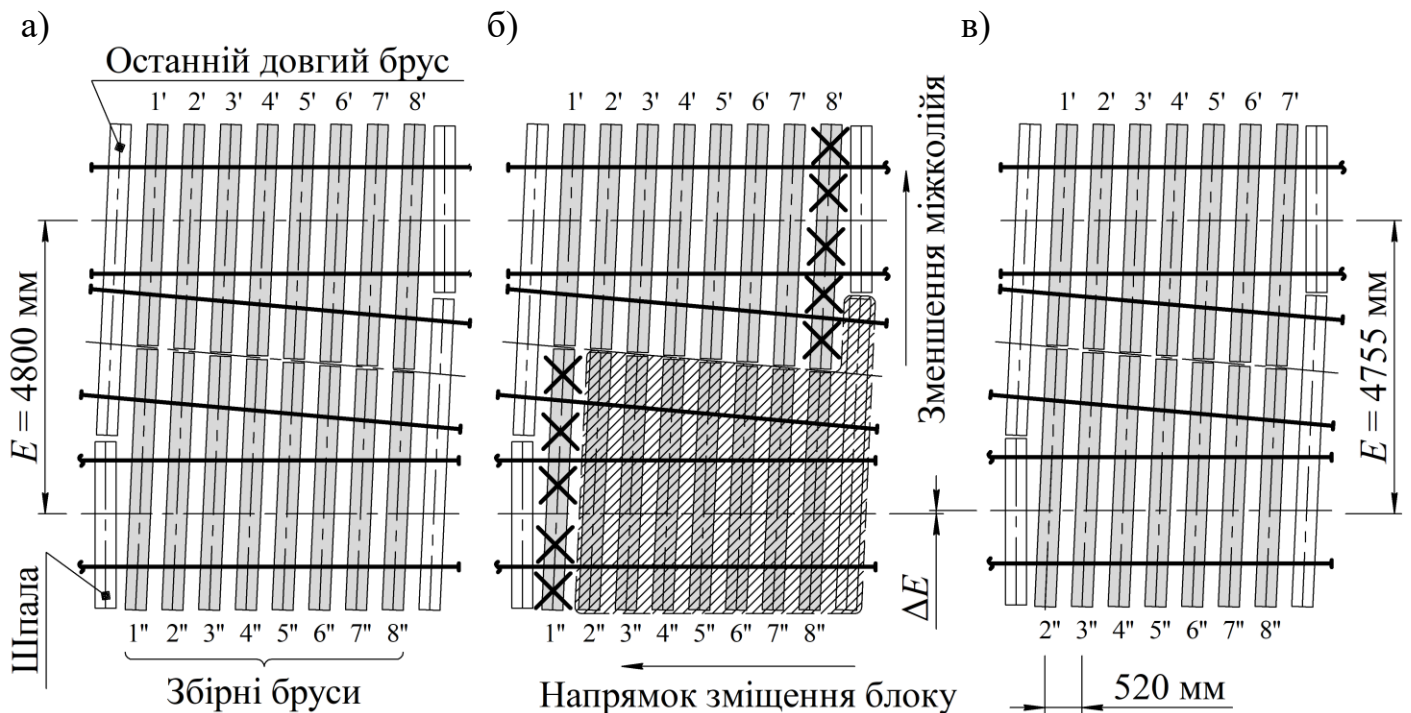


Рис. 4. Переміщення підрейкової основи з'єднувальної частини з'їду:

а) і в) до та після зміщення; б) вилучення зайвих напівбрусів

Маючи в своєму розпорядженні типовий набір збірних брусів для міжколій 5,0 м, на етапі розрахунків можна встановити відповідну комплектність для заданих проектних умов та під час укладання застосовувати вже заздалегідь сформовані блоки. При цьому транспортування останніх не призведе до порушення габаритів.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є закінченою науковою працею, у якій вирішено актуальне науково-технічне завдання з удосконалення нормативів утримання та конструкції стрілочних з'їздів. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають у такому:

1. Аналіз існуючої нормативної бази щодо утримання колії на з'їздах засвідчив необхідність їх удосконалення та доповнення. Причиною таких заходів є те, що оцінка положення стрілочних з'їздів у плані шляхом контролю відстані між центрами стрілочних переводів (як єдиний існуючий норматив) не дає відповіді щодо допустимої швидкості руху при її недотриманні та при наявності геометричних нерівностей.

Вітчизняні та закордонні науковці у своїх роботах з питань динаміки взаємодії колії та рухомого складу приділяли увагу або детальному опису моделі вагона та спрощенню колії, де її маса зосереджена в одній точці (чи взагалі безінерційна), або навпаки, представленню верхньої будови колії як багатоелементної моделі, та імітацію рухомого складу у вигляді одиночної динамічної сили (таке представлення екіпажу обмежує дослідження впливу групи нерівностей на динаміку взаємодії).

2. З метою визначення реального геометричного стану стрілочних з'їздів на залізницях України розроблено методику оцінки положення з'їздів у плані, що дозволила встановити допустиму швидкість руху від раніше недостатньо вивченого впливу геометричних параметрів з'їзду та нерівностей у плані. У ході експлуатаційних досліджень виявлено, що чіткої кореляційної залежності між величиною міжколійя та обмеженням швидкості руху поїздів (при появі нерівностей у плані) не існує. В результаті аналізу даних вимірювань встановлено, що на 23% з'їздів вимагається обмеження швидкості руху, на 8% – закриття руху.

3. Удосконалено математичну модель взаємодії рухомого складу та колії у межах з'їзду, що одночасно враховує складну систему тіл вагона та колії, а також їх специфічні конструктивні особливості. Зокрема: під одним колесом колія представлена як багатомасова модель з параметричною зміною інерційних та пружних характеристик уздовж з'їзду; враховано зміну зазорів у ковзунах та появу відновлювального моменту при боковому хитанні кузова; для поєднання тіл системи використано різні типи лінійних та нелінійних зв'язків – пружно-в'язкий (модель Кельвіна-Фойгта), «сухого» тертя, кріпа, тощо. Застосування удосконаленої моделі дозволило більш точно встановити параметри взаємодії в системі «колія-екіпаж» на з'їзді.

4. Для підтвердження адекватності вдосконаленої математичної моделі проведено експериментальні дослідження на стрілочному з'їзді. Враховуючи, що вага завантажених піввагонів практично однакова (898 та 902 кН), для кожного вимірювального приладу, що знаходився на дослідній ділянці, отримано по 408 значень. Правильність визначення мінімально необхідної кількості дослідних поїздок, а й відповідно, і репрезентативність вибірки, підтверджено отриманим значенням коефіцієнта варіації, меншим за допустимий рівень 0,4 (для вертикальних сил – 0,08..0,15, для напружень в кромках підшви та головки рейки – 0,12..0,23, для бокових сил – 0,11..0,32).

Якісна та кількісна верифікація експериментальних даних та моделювання показала розбіжність результатів у межах 9–13%, що підтверджує адекватність удосконаленої моделі.

5. Встановлено, що найбільш несприятливою, з точки зору динамічної взаємодії, є схема укладання вкороченого з'їзду з однаковими марками. Так, у порівнянні зі звичайним з'їздом між паралельними коліями значення бокових сил у межах захрестовинної частини збільшуються на 72,7–76,5% для скорочених.

6. Співвідношення нормативних вимог для звичайної колії та отриманих шляхом моделювання для прийнятої розрахункової схеми з'їзду, дозволило удосконалити нормативи утримання стрілочних з'їздів у плані та поздовжньому профілі, а саме: отримано допустимі характеристики нерівностей колії з відповідними швидкостями руху.

7. На основі кількісного критерію оцінки механічної роботи вертикальної сили, що викликає динамічний прогин колії, підтверджено прискорення процесу зростання деформацій, спричиненого порушенням епюри укладання брусів. Так, зростання відстані між осями брусів на 40% призводить до зростання механічної роботи на 49%.

8. Для найбільш розповсюджених проектів стрілочних переводів отримано граничні значення міжколійя (як одного з ключових геометричних параметрів з'їздів), яке дозволяє вкладати підрейкові опори без порушення: при використанні вкорочених асиметричних шпал по прямому напрямку розміщення повного комплексу (включно з брусами довжиною 5000 мм) є можливим лише при міжколійній відстані більше 4,8 м; при використанні типових шпал – при міжколійній відстані більше 5,0 м. Таким чином, для розрахунку з'їздів, що укладаються у міжколійя менше отриманих значень, доцільно застосовувати додатково методику оцінки максимальної довжини останнього довгого бруса комплексу, який ще можна розмістити в захрестовинній частині.

9. Запропоновано використовувати збірні бруси в захрестовинній частині стрілочних з'їздів для вирішення проблеми порушення епюри. Даний підхід дозволяє підлаштувати підрейкову основу до необхідного міжколійя. Крім того, за допомогою збірної підрейкової основи транспортування та укладання блоків стрілочного з'їзду зводиться до аналогічного процесу як і для звичайної колії.

10. Положення й результати дисертаційної роботи увійшли в нормативний документ АТ «Укрзалізниця», а також упроваджено в навчальний процес кафедри «Колія та колійне господарство», та використовуються під час підвищення кваліфікації фахівців колійного господарства в Навчально-науковому центрі розвитку професійної освіти Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

***Основні положення і результати дисертації опубліковані у виданнях, які індексовані в Index Copernicus і є фаховими:***

1. Арбузов М. А. Експериментальні дослідження взаємодії колії та рухомого складу в межах з'їзду / М. А. Арбузов, О. М. Патласов, С. О. Токарев // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 5 (65). – С. 64-78. – doi 10.15802/stp2016/84013.

2. Патласов О. М. Розрахунок елементів з'єднання збірною дерев'яною бруса для стрілочних переводів / О. М. Патласов, С. О. Токарев // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 88–100. – doi: 10.15802/stp2015/57029.

3. Patlasov O. M. Establishment of the permissible train speed on the curved turnouts / O. M. Patlasov, S. O. Tokariev, Ye. O. Patlasov // Science and Transport Progress. – 2016. – № 2 (62). – P. 98-108. – doi: 10.15802/stp2016/67318.

4. Patlasov O. M. The measurement methodology improvement of the horizontal irregularities in plan / O. M. Patlasov, S. O. Tokariev // Science and Transport Progress. – 2015. – № 4 (58). – P. 121-131. doi: 10.15802/stp2015/49219.

***у фахових виданнях:***

5. Рибкін В. В. Збірний залізобетонний брус для стрілочних з'їздів між паралельними коліями / В. В. Рибкін, С. О. Токарев // Збірник наукових праць Донецького ін-ту залізн. тр-ту. – Донецьк, 2012. – Вип. 31. – С. 212-218.

6. Рибкін В. В. Історичний аналіз теоретичних та експериментальних досліджень динаміки колії, стрілочних переводів та рухомого складу / В. В. Рибкін, П. В. Панченко, С. О. Токарев // Збірник наукових праць Донецького ін-ту залізн. тр-ту. – Донецьк, 2012. – Вип. 32. – С. 277-288.

***Додаткові праці, що є нормативними документами АТ Укрзалізниці:***

7. Методика контролю положення стрілочного з'їзду у плані: СТП 06-001:2015 / В. В. Рибкін, М. А. Арбузов, П. В. Панченко, С. О. Токарев. – Київ: Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2015. – 10 с.

***тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:***

8. Арбузов М. А. Експериментальні дослідження взаємодії колії та рухомого складу в межах з'єднувальної частини стрілочних з'їздів / М. А. Арбузов, О. М. Патласов, С. О. Токарев // Тези доповідей на XIV Міжнародній конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение», 25-27.05.2016. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 16.

9. Патласов О. М. Аналіз впливу локальних та регулярних геометричних нерівностей колії на умови взаємодії з рухомим складом в межах стрілочного з'їзду / О. М. Патласов, С. О. Токарев // Тези доповідей на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», 19-21.04.2017. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – 214-216 с.

10. Патласов О. М. Особливості взаємодії колії та рухомого складу в межах з'єднувальної частини стрілочних з'їздів / О. М. Патласов, С. О. Токарев // Тези доповідей на 75 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2015. – 248-249 с.

11. Патласов О. М. Удосконалення конструкції підрейкової основи з'єднувальної частини стрілочних з'їздів / О. М. Патласов, С. О. Токарев // Тези доповідей на 75 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15.05.2015. – Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2015. – 249-250 с.

12. Рибкін В. В. Аналіз положення стрілочних з'їздів на залізницях України / В. В. Рибкін, П. В. Панченко, С. О. Токарев // Проблеми взаємодії колії та рухомого складу: праці Міжнародної науково-практичної конференції, яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана, 19-20.09.2013. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – С. 69.

***патенти:***

13. Пат. 80833 Україна, МПК Е01ВВ 7/00. Збірний залізобетонний брус / Токарев С. О., Віблій Б. М.; власник Токарев С. О. – № u201215030; заявл. 27.12.2012; опублік. 10.06.2013, Бюл. № 11. – 3 с.

**АНОТАЦІЯ**

**Токарев С. О.** Удосконалення нормативів утримання та конструкції стрілочних з'їздів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія. – Дніпровський національний університет залізнич-

ного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена удосконаленню нормативів утримання та конструкції стрілочних з'їздів. У роботі проаналізовано схеми укладання двох стрілочних переводів у з'їзд. Проаналізовано сучасні конструкції з'їздів та встановлено нові тенденції розвитку залізобетонної підрейкової основи в межах стрілочних переводів та з'їздів на закордонних залізницях. Проведено аналіз розвитку теоретичних та експериментальних досліджень з питань взаємодії колії та рухомого складу в прямих та кривих ділянках, а також на стрілочних переводах, що в сукупності формують будь-яку схему укладання з'їзду. Розроблено методику оцінки положення з'їздів у плані, яка базується на вимірюванні ординат від базисної лінії. Досліджено натурний стан захрестовинної частини стрілочних з'їздів на залізницях України. Удосконалено математичну модель взаємодії колії та рухомого складу, що дозволила більш точно встановити характер силового впливу рухомого складу на колію в межах з'їзду. Проаналізовано особливості впливу вантажного рухомого складу на напружено-деформований стан залізничної колії у межах з'єднувальної частини з'їзду за результатами експериментальних досліджень. Визначено найбільш несприятливу схему укладання з'їзду за критерієм впливу на колію та безпеки руху. Для обраної схеми встановлено співвідношення нормативних вимог для звичайної колії та отриманих шляхом моделювання, що дозволило удосконалити нормативи утримання з'їздів. Доповнено методику розрахунку з'їзду при його проектуванні для заданих умов експлуатації шляхом введення додаткової перевірки максимально-можливої довжини бруса, що розташовується в захрестовинній частині стрілочного з'їзду без порушення епюри. Удосконалено конструкцію з'їздів за рахунок використання збірної підрейкової основи, що дозволяє їх розмішувати при значенні міжколійя менше 5,0 м.

**Ключові слова:** стрілочний з'їзд, методика вимірювання, взаємодія колії та рухомого складу, нормативи утримання, підрейкова основа, брус, верхня будова колії, напружено-деформований стан.

## ABSTRACT

**Tokariiev S. O.** Improvement of the maintenance standards and design of railway crossovers. – The qualification scientific work on the manuscript.

Thesis in support for a Candidate of Technical Science degree, specialty 05.22.06 – railway track. – Academician V. Lazaryan Dnipro National University of Railway Transport, Dnipro, 2021.

The thesis is dedicated to the improvement of the maintenance standards and design of railway crossovers. In present work the installation schemas of two turnouts in a single crossover were analyzed. Found that according to the plan of the adjacent tracks, tangent of crossing angle and the plan of the connecting part, the total number of single crossovers reaches to 40 various combinations. Analyzed modern designs of crossovers and established new development trends of a concrete under-rail base within turnouts and crossovers on foreign railways.

An analysis of previous theoretical and experimental researches of the rolling stock-

track interaction within straight and curved track, as well as turnouts has been carried out.

A method for estimating the crossover position in plan (based on measuring the ordinates from the baseline) has been developed. The real condition of the single crossovers on Ukrainian railways has been studied. Based on the transform technique of measured ordinates to versines, the way for establishing the permissible speed at curved turnouts was proposed.

The mathematical model of the rolling stock-track interaction has been improved which will allow determining features of the force action of the rolling stock on track within the crossovers more accurately. The improvement is achieved by simultaneously considering the complex multi-mass car model and railway track, as well as taking into account their unique constructional features. In particular: under one wheel the track is presented as a multi-mass model with parametric change of its inertial and elastic characteristics along the permanent way; it's considered the change of gaps in the side bearings and an appearance of the recovery moment during car body rolling; different types of linear and nonlinear links were used to connect the body system – viscoelastic link (Kelvin-Voigt model), Coulomb damping, creep, etc.

To confirm the adequacy of the improved mathematical model, experimental studies were conducted at railway crossover. Based on the experimental results the influence features of freight rolling stock on the permanent way stress-strain state within the connecting part of single crossovers have been analyzed. The correctness of determining the minimum required number of research trips and the sample representativeness is confirmed by the obtained value of the coefficient of variation, less than the allowable level of 0.4.

A qualitative and quantitative verification of the experimental data and simulated results showed a variance in the range of 9-13%, which confirms the adequacy of the improved model.

Determined the most unfavorable scheme of single crossovers by the criterion of impact on railway track and traffic safety. For the selected crossover scheme established the ratio between regulatory requirements for a conventional railway track and obtained via mathematical model.

Based on a quantitative criterion for evaluating the mechanical work of the vertical force, causing a dynamic displacement of the track, an increase of the deformation growth caused by a violation of the laying sleeper schema was confirmed. For example, increasing the distance between the beams by 40% increases the mechanical work to 49%.

A technique for determining the maximum possible length of the beams that can be located within the blocks of crossovers without violating the distance between concrete or wooden beams has been developed.

Proposed the design of the under-rail base, which will allow placing the single crossovers at the inter-track distances with width up to 4.1 m and showed the general principle of blocks composition during railway track installation.

**Keywords:** railway crossover, measurement technique, rolling stock-track interaction, maintenance standard, under-rail base, beam, permanent way, stress-strain state.

**ТОКАРЄВ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВІВ УТРИМАННЯ  
ТА КОНСТРУКЦІЇ СТІЛОЧНИХ З'ЇЗДІВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат 60x84 1/16.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 50 пр.

Видавництво Дніпровського національного  
університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03

вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010