

УДК 625.143.482

*Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДАЗТ)*

*Орел Є.Ф., к.т.н., доцент (УкрДАЗТ)*

### **КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯВИЩА ВТРАТИ СТІЙКОСТІ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ ЗІ ЗМІШАНИМИ ПІДРЕЙКОВИМИ ОПОРАМИ**

На залізницях України в основному експлуатуються дві конструкції верхньої будови колії: безстикова колія на залізобетонних шпалах й ланкова колія на дерев'яних шпалах. В останній час через певні умови з'явилася „нова” конструкція верхньої будови колії з рейко-шпальною решіткою з дерев'яними й залізобетонними шпалами (в певному чередуванні). Тобто має місце конструкція верхньої будови з рейко-шпальною решіткою зі змішаними підрейковими опорами, що визначається безліччю недостатньо вивчених нелінійних параметрів. Відомі аналітичні методи оцінки стійкості колії не завжди можуть забезпечити точне рішення такої задачі. У зв'язку із цим актуальними будуть представлятися розрахункові схеми, засновані на методах математичної фізики для рішення задач стійкості й геометричної нелінійності. Дана стаття присвячена питанням моделювання явища втрати стійкості колії із залученням ПК ЛІРА [1], заснованого на методі кінцевих елементів [2].

Сучасні інформаційні технології розрахунку й проектування, засновані на розвинутих технічних платформах, широко використовуються в області будівельних конструкцій [3]. У цей час використання методу кінцевих елементів дозволяє при проектуванні врахувати безліч специфічних характеристик (фізична або геометрична нелінійність), що робить особливо привабливим цей метод при рішенні завдань механіки залізничного транспорту. Зокрема відомі роботи ДНУЗТ [4] або розробки НИИАСС [5]. Разом з тим, методи кінцево-елементного моделювання стосовно до питань оцінки стійкості колії реалізовані недостатньо.

Ідея досліджень даної статті полягає в розробці кінцево-елементної моделі прямої ділянки колії, а також моделюванні механічних характеристик опірності й умов розвитку критичного стану (по стійкості).

Дослідження процесу втрати стійкості можливо після введення спеціального ряду передумов, що створюють засоби для моделювання по трьох напрямках: моделювання нелінійних механічних характеристик опірності колії; побудова кінцево-елементної розрахункової схеми; моделювання умов розвитку критичного стану колії на локальній ділянці.

**Моделювання вузлових параметрів РШР.** Основними механічними характеристиками, що визначають стійкість безстикової колії, є опір баласту зміщенню рейко-шпальної решітки й опірність проміжних скріплень повороту рейок відносно шпал в горизонтальній площині. Опірність баласту зміщенню шпал в поперечному й поздовжньому напрямках обумовлена силами тертя й зчеплення шпал із щебенем по її підшві, боковій поверхні й торцям. Дані характеристики вивчені досить добре. Їх величина характеризується великою дисперсією у силу впливу цілого ряду нелінійних факторів. Для кінцево-елементного моделювання опірності баласту зсуву шпал використовують залежності, що зв'язують переміщення одиночної шпали й навантаження, яке прикладається до шпали й змінюється поступово. У даній роботі використані експериментальні дані, отримані в лабораторних умовах, які добре погодяться з роботами ВНИИЖТа [6,7]. На рисунку 1,а приведена прийнята в розрахунок залежність зміни сили опору щебеневого баласту при переміщенні одиночної шпали поперек осі колії.

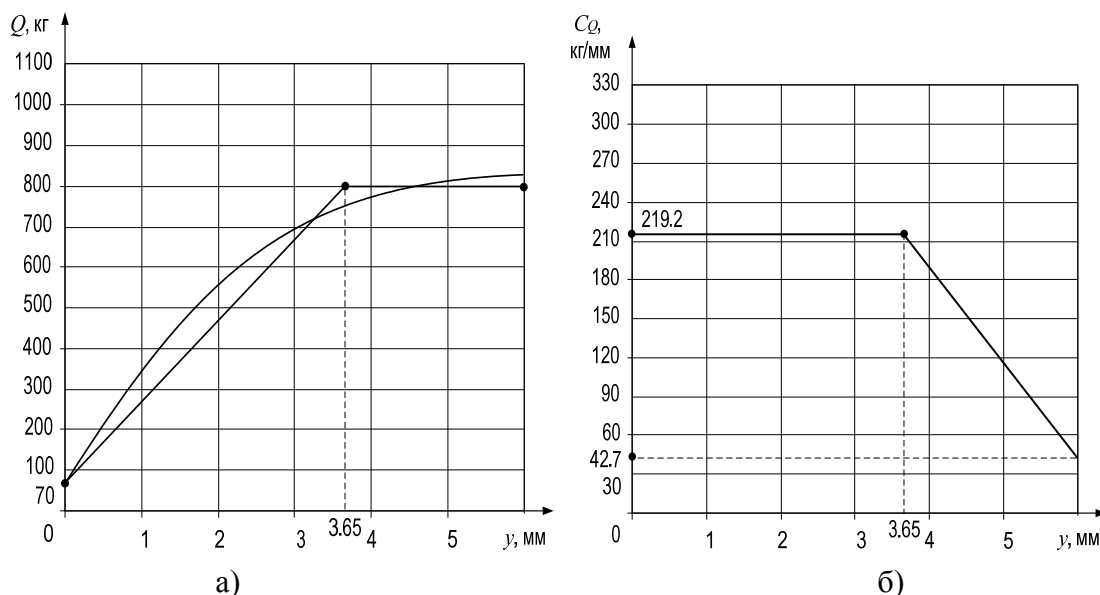


Рисунок 1 - Опір баласту зсуву шпали поперек осі колії

Апроксимація цієї залежності визначена двома прямими ділянками. Перша ділянка враховує чисто пружний опір баласту, що має місце при досить малих переміщеннях шпали. Далі діаграма припускає «зрив», тобто спостерігається зміщення шпали при постійному опорі до виникнення нового рівноважного стану. При цьому величина «зривного» зусилля на підставі чисельного експерименту була встановлена на рівні 800 кг. У розрахунковій схемі дана діаграма представлена в осях  $C_q$  і  $y$ , де  $C_q$  (кг/мм) – основна характеристика кінцевого елемента (кінцева жорсткість), що моделює поперечний зв'язок шпал з баластом (див. рисунок 1,б).

На рисунку 2,а показана прийнята для розрахунків залежність зміни сили опору баласту при переміщенні одиночної шпали уздовж осі колії. Ця залежність також апроксимувалася двома лінійними графіками, а в осях  $C_r$  і  $x$  (рисунок 2,б) – двома горизонтальними ділянками із зазорами, фізичний зміст яких визначається миттєвою зміною опірності баласту (поздовжній «зрив») і переходом у новий рівноважний стан. Тут  $C_r$  (кг/мм) – жорсткість кінцевого елемента, що моделює поздовжній зв'язок шпал з баластом.

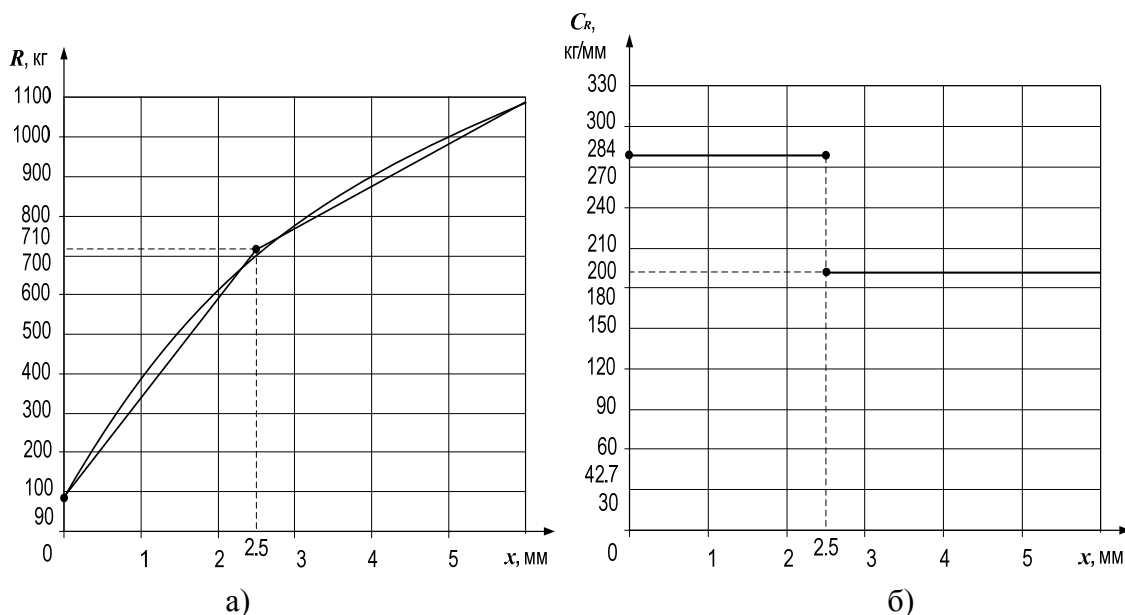
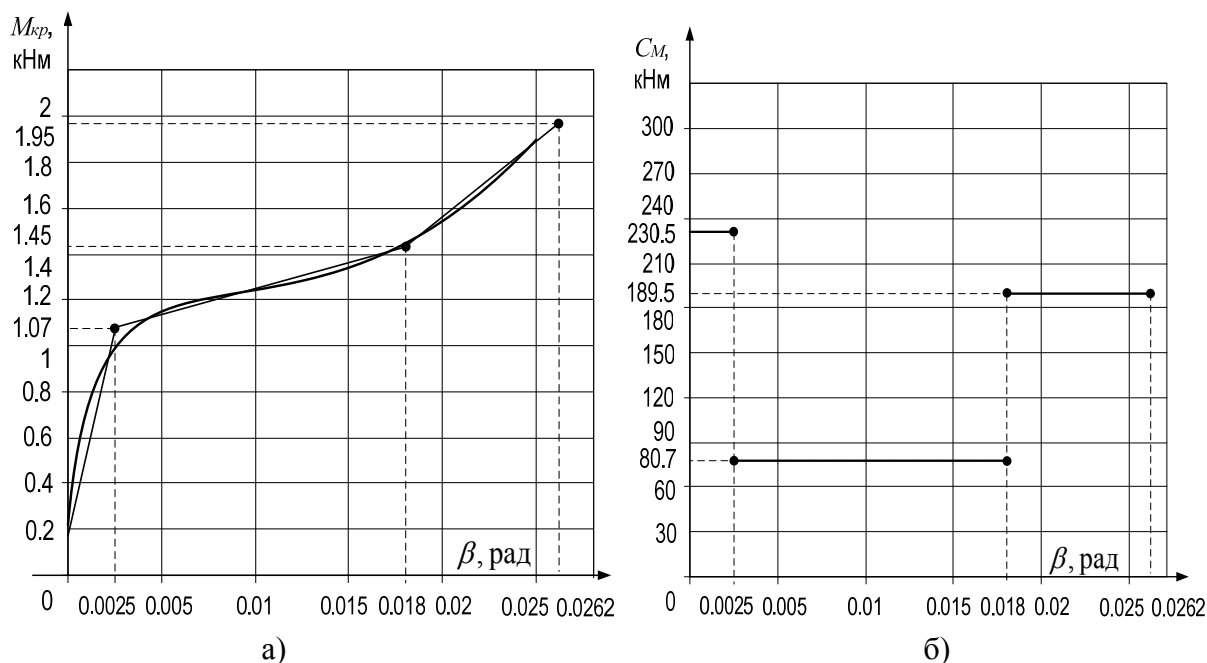


Рисунок 2 - Опір баласту зсуву шпали уздовж осі колії

Опірність проміжних скріплень повороту рейки в горизонтальній площині обумовлена видом скріплення й ступенем притиснення рейки до підрейкової основи. Для кінцево-елементного моделювання жорсткості скріплень застосовувалися експериментальні залежності, методика

визначення яких полягає в прикладанні до фрагмента рейки крутного моменту й реєстрації виникаючого кута повороту рейки щодо шпали. Данні розрахунки також ґрунтуються на експериментальних дослідженнях, проведених спеціалістами УкрДАЗТ. Подібні роботи проводилися і в лабораторії ВНИИЖТ стосовно до малих кутових деформацій [8,9].

На рисунку 3,а показана прийнята в розрахунок залежність зміни моменту опору для рейкового скріплення КБ-65 від горизонтального кута повороту рейки відносно шпали. Апроксимація цієї діаграми виконана трьома ділянками, фізичний зміст яких визначається особливістю роботи елементів вузла скріплення при повороті рейки на кут  $\varphi$ . Перша ділянка враховує пружний опір, при якому опірність вузла скріплення залежить від рівня натяжки його болтів. Друга ділянка діаграми передбачає «зрив». При цьому опірність вузла скріплення визначається силами тертя між подошвою рейки й підрейковою основою. Остання, третя ділянка описує ефект плавного збільшення величини опору при більших кутових переміщеннях, коли відбувається «заклинювання» рейки у вузлі скріплення. У розрахунковій схемі дана діаграма представлена в осях  $C_m$  і  $\varphi$  (рисунок 3,б), де  $C_m$  – основна характеристика кінцевого елемента, що моделює опірність вузла скріплення на горизонтальний поворот рейки відносно шпали;  $\varphi$  – кут повороту рейки.



**Рисунок 3 - Опірність вузла проміжного скріплення типу КБ-65 повороту при затягуванні гайок болтів зусиллям 150 Нм**

**Моделювання конструкції РШР.** Розрахункова схема ділянки колії довжиною 200 м побудована на базі трьох типів кінцевих елементів (див. рисунок 4) і представляється у вигляді стержневої моделі, у якій кінцеві елементи (рейки й шпали) включені в спільну роботу. Моделювання представлених вузлових характеристик відповідно до прийнятих функцій і передумов виконувалося із залученням спеціальних, геометрично нелінійних кінцевих елементів (КЕ): одно-вузлових КЕ зв'язку кінцевої жорсткості й двох-вузлових КЕ пружного зв'язку між вузлами. КЕ зв'язку кінцевої жорсткості вводиться у вузли шпал і моделює роботу баласту на зсув шпали. Нелінійність цього КЕ визначається значеннями граничних лінійних деформацій, при досягненні яких відбувається відповідна зміна жорсткості. КЕ пружного зв'язку між вузлами моделює роботу проміжного скріплення. Нелінійність цього КЕ визначається значеннями граничних кутових деформацій, при досягненні яких відбувається відповідна зміна жорсткості. Моделювання роботи шпал і рейок здійснювалося за допомогою універсальних стержневих КЕ. Жорсткість цих КЕ визначається програмою на підставі уведеної точної геометричної форми поперечного переріза, модуля пружності й коефіцієнта Пуассона.

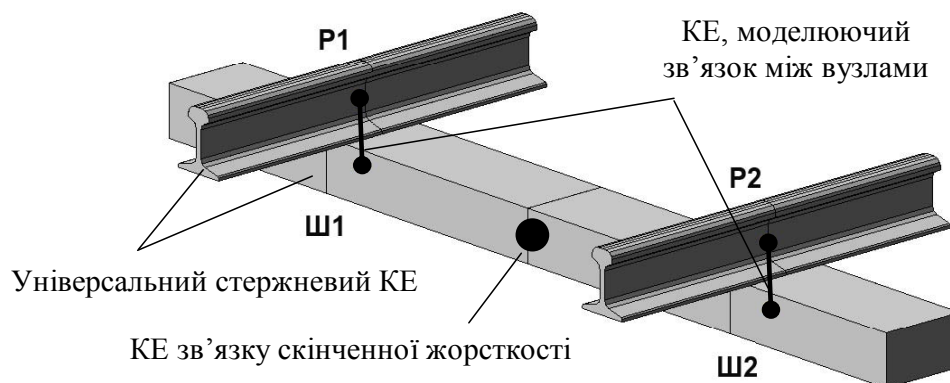


Рисунок 4 - Моделювання граничних умов

Модель досліджувалася на дію температурної сили, яка поступово зростала через рівномірне нагрівання рейкових плітей. При цьому збільшення температури визначалося залежністю:

$$\Delta t = N_t / EA\alpha, \quad (1)$$

де  $\Delta t = t_{\phi} - t_3$  – різниця між температурою закріплення рейкових плітей і фактичною їх температурою;  $EA = 1.71 \times 10^6$  кг – поздовжня жорсткість рейки;  $\alpha = 0.0000118$  °C<sup>-1</sup> – коефіцієнт температурного розширення рейкової сталі.

**Модельовання періодичної нерівності РШР.** Одне з основних питань модельовання роботи колії на поздовжні навантаження полягає в урахуванні його локальної «побутової» нерівності.

Відомо, що стійкість безстикової колії проти викиду залежить не тільки від її температурно-напруженого стану, але й від наявності геометричної нерівності колії в плані [7]. У якості параметрів нерівності, що впливають на значення критичної температурної поздовжньої сили, розглядається амплітуда нерівності, та її довжина.

Для розробленої кінцево-елементної моделі параметри горизонтальної нерівності колії задавалися з урахуванням того факту, що періодичні нерівності на нескінченно протяжній ділянці колії не буває, а небезпечний стан конструкції ВБК по стійкості визначається хоча б одним періодом нерівності критичної довжини. У результаті до розгляду приймається найбільш загальний випадок, коли на критичній довжині  $L_k = 12$  м укладається повний період косінусоїдальної нерівності з амплітудою  $C_b = 10$  мм.

**Результати розрахунків.** Розрахунок на дію поздовжніх температурних сил здійснюється для різних конструкцій рейко-шпальної решітки з епюрой 1840 шт/км і фіксованими амплітудою (7 мм) і довжиною (12м) горизонтальних нерівностей рейкових плітей. Розрахунком досліджувалися моделі з проміжним скріпленням типу КБ-65 і типу Д0.

У процесі нелінійного розрахунку при ступеневому зростанні величини температурної сили програма визначає закони розподілу зусиль у кінцевих елементах й використовує на кожному новому кроці завантаження розрахункової системи її напружено-деформований стан, що отриманий на попередньому кроці. При цьому, приступаючи до нової ітерації для кожного зі спеціальних КЕ, що моделюють нелінійність вузлових характеристик, відповідно до прийнятих функцій, жорсткості елементів моделі коректуються. Такі умови зміни початкових параметрів створюють можливість нелінійного розвитку додаткових поперечних деформацій конструкції ВБК на ділянці «побутової» нерівності колії. Відповідно до прийнятої в розрахунках діаграми (див. рисунок 1) при досягненні сумарних деформацій критичного значення 3.65 мм відбувається «зрив» опірності баласту поперечному зсуву шпал й

спостерігається за цим процес поступового зниження жорсткості  $C_Q$ , що в кінцевому результаті й приводить до втрати поперечної стійкості конструкції безстикової колії.

Після визначення зусиль в елементах колії й обчислення кінцевих вузлових жорсткостей, виконується перехід до розрахунку на стійкість, що припускає пошук таких значень числового параметра  $\lambda_0$ , при яких відбувається втрата стійкості системи в результаті виникнення в рейкових плітях критичних температурних сил  $F_{кр} = \lambda_0 \times N$ . При цьому, для кожного значення критичної температурної сили виконується визначення відповідної форми втрати стійкості конструкції ВБК.

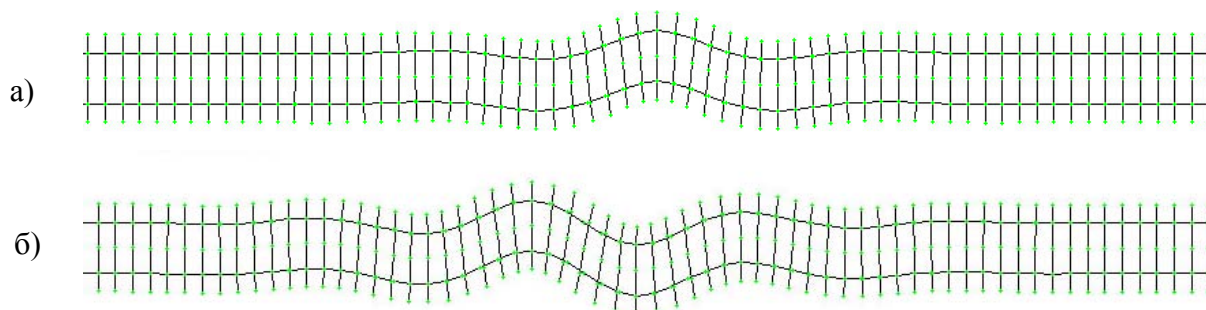


Рисунок 5 - Форми втрати стійкості для колії на з.б. шпалах і скріплення типу КБ-65 (а – одна хвилюва; б – двоххвилюва)

Для колії на залізобетонних шпалах, щебеновому баласті й скріпленні типу КБ-65 отримано дві форми втрати стійкості конструкції ВБК: однахвилюва, що виникає при навантаженні  $F_{кр} = 186$  т на довжині 21.5 м, і двоххвилюва, що виникає при навантаженні  $F_{кр} = 220$  т на довжині 26.5 м (див. рисунок 5). Для колії на дерев'яних шпалах і щебеновому баласті також отримано дві форми втрати стійкості конструкції ВБК: однахвилюва, що виникає при навантаженні  $F_{кр} = 161$  т на довжині 21.8 м, і двоххвилюва, що виникає при навантаженні  $F_{кр} = 196.4$  т на довжині 26.7 м (див. рисунок 6).

При розрахунках для костильного скріплення типу Д0 його опірність повороту рейок відносно шпал приймається постійною на рівні 0.1 кНм, що характеризує роботу досить зношеного скріплення.

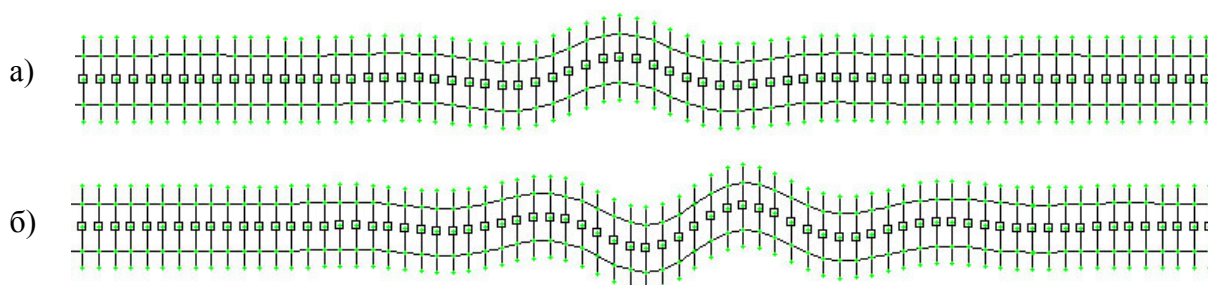


Рисунок 6 - Форми втрати стійкості для колії на дерев'яних шпалах і костильному скріпленні (а – одна хвильова; б – двохвильова)

На рисунку 7 зображена форма втрати стійкості для випадку, коли в колії покладено 50% залізобетонних шпал зі скріпленням КБ-65. При цьому викид колії досягається при навантаженні  $F_{кр}=170.5$  т на довжині 21.2 м.

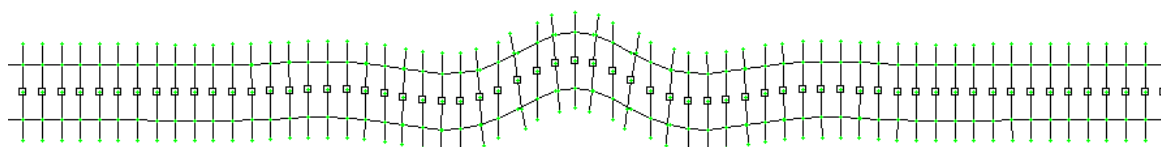


Рисунок 7 - Однахвильова форма втрати стійкості для колії з 50%-им укладанням з.б. шпал зі скріпленням типу КБ-65.

До основного достоїнства даних досліджень можна віднести прийнятий підхід до розрахунку стійкості колії, заснований на використанні МКЕ для врахування нелінійності вузлових характеристик опірності РШР, а також моделювання умов розвитку критичного, з погляду стійкості, стану прямої ділянки колії на локальній ділянці. Розроблена кінцево-елементна модель прямої ділянки колії враховує дійсну залежність спільної роботи рейок зі шпалами, нелінійність опору баласту зрушенню й дозволяє одержати форму втрати стійкості на локальній ділянці залежно від параметрів періодичної нерівності. Перспектива подальшого дослідження пов'язана з вивченням залежностей впливу амплітуди та довжини горизонтальних нерівностей рейкових плітей на значення критичної сили.



***Список літератури***

1. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Мельников С.Л., Мексименко В.П. Программный комплекс ЛИРА-Windows. Руководство пользователя. //К.: НИИАСС, 1996.- Том 1-8.
2. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс ЛИРА-Windows.//К.: Факт, 1997.-С.137
3. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
4. Сладковский А.В., Ситаж М., Мартыненко Ю.Р. Решение задач механики железнодорожного транспорта с помощью МКЭ: Монография. – Д.: Новая идеология, 2002. – 220 с.
5. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. //К.: Факт, 2005. -344 с.
6. Новакович В.И. и др. Сопротивление брусьев сдвигу//Путь и путевое хозяйство. 2004. №9. С. 18-19.
7. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: Транспорт, 1997. 326 с.
8. Баклаги Е.С., Лебедев А.В. Сопротивление повороту рельса относительно шпалы в горизонтальной плоскости//Вестник ВНИИЖТ. 2005. №4. С.37-39.
9. Коган А.Я., Лебедев А.В. Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях их эксплуатации// Вестник ВНИИЖТ. 2007. №2. С.3-9.