

БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра колії та колійного господарства

**ТЕХНІЧНИЙ РЕСУРС ВЕРХНЬОЇ БУДОВИ
БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для самостійної роботи з дисципліни**

«КОЛІЙНЕ ГОСПОДАРСТВО»

Харків – 2019

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри колії та колійного господарства 23 вересня 2019 р., протокол № 3.

У методичних вказівках розглядаються питання, які стосуються оцінювання технічного ресурсу конструкції верхньої будови безстикової колії.

Рекомендується для студентів усіх форм навчання, які вивчають дисципліну «Колійне господарство».

Укладачі:

доц. А. М. Штомпель,
асистенти А. С. Малішевська,
Н. О. Муригіна

Рецензент

доц. Д. А. Фаст

ТЕХНІЧНИЙ РЕСУРС ВЕРХНЬОЇ БУДОВИ
БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для самостійної роботи з дисципліни

«КОЛІЙНЕ ГОСПОДАРСТВО»

Відповідальний за випуск Малішевська А. С.

Редактор Еткало О. О.

Підписано до друку 04.11.19 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,5. Тираж 30. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Види технічного стану залізничної колії.....	4
2 Накопичення деформацій рейкової колії при напрацюванні тоннажу.....	14
3 Ресурс рейок залізничної колії.....	23
4 Технічний ресурс залізобетонних шпал.....	26
5 Технічний ресурс проміжного скріплення типу КБ.....	28
6 Технічний ресурс рейко-шпальної решітки безстикової колії.....	30
7 Показники працездатності щебеневого баласту при напрацюванні тоннажу.....	33
8 Технічний ресурс верхньої будови безстикової колії.....	36
9 Оцінка технічного стану конструкції безстикової колії на ділянці залізниці.....	37
Список літератури.....	40

ВСТУП

Основною конструкцією верхньої будови на залізницях України є безстикова колія на залізобетонних шпалах, яка експлуатується майже на 75 % розгорнутої довжини головної колії.

Від технічного стану конструкції верхньої будови колії (ВБК) значною мірою залежить реалізація процесу залізничних перевезень.

У методичних вказівках розглядаються питання, які стосуються видів технічного стану залізничної колії та прогнозу оцінки технічного ресурсу конструкції безстикової колії при напрацюванні тоннажу.

1 ВИДИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Основною продукцією колійного господарства є технічний стан конструкції залізничної колії (ЗК), яка експлуатується. Згідно з пунктом 3.1 [1] «усі елементи залізничної колії ... за ... станом мають забезпечувати безпечний і плавний рух поїздів із швидкостями, встановленими на даній ділянці».

Якість продукції колійного господарства (технічний стан конструкції ЗК) визначається рівнем відповідності її показників діючим вимогам.

Під технічним станом залізничної колії розглядається сукупність певних властивостей конструкції колії, які схильні до змін у процесі її експлуатації й характеризуються у конкретний момент часу ознаками, що встановлені відповідною технічною документацією.

Технічний стан колії визначається через порівняння фактичних значень її характеристик з нормативними.

Конструкція ЗК у процесі експлуатації може перебувати в одному з таких станів (рисунок 1.1):

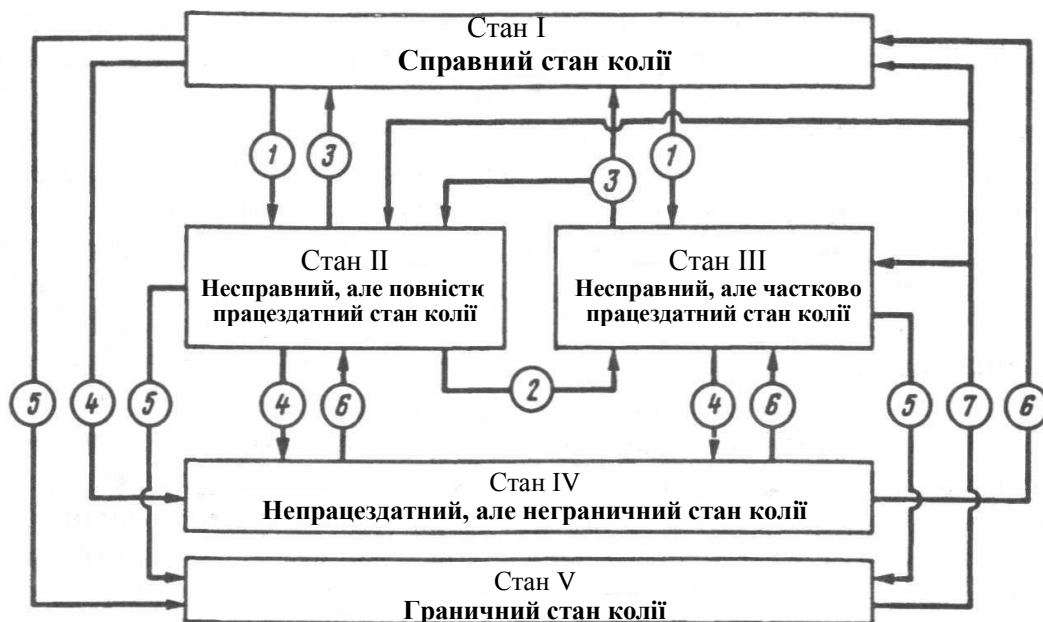
стан I – стан конструкції ЗК без відступів від норм і допусків на її улаштування та утримання (справний стан);

стан II – стан конструкції ЗК з відступами від норм і допусків на її улаштування та утримання, але повністю працездатний (несправний, але повністю працездатний стан);

стан III – стан конструкції ЗК з відступами від норм і допусків на її улаштування та утримання, але частково працездатний, тобто з місцевим обмеженням швидкості руху поїздів (несправний, але частково працездатний стан);

стан IV – непрацездатний, але неграничний стан конструкції ЗК (місцева повна відмова у роботі колії; потребує огороження сигналами зупинки до відновлення працездатного стану);

стан V – граничний стан конструкції ЗК (подальша експлуатація колії небезпечна без виконання її ремонту відповідного виду).



1 – накопичення пошкоджень колії; 2 – часткова відмова колії; 3 – поточне утримання (технічне обслуговування) колії; 4 – повна відмова колії; 5 – перехід у граничний стан (через появу несправностей колії, які не підлягають усуненню при її поточному утриманні); 6 – відновлення працездатного стану колії; 7 – ремонт колії відповідного виду (модернізація, капітальний, середній, комплексно-оздоровчий та ін.)

Рисунок 1.1 – Схема основних видів технічного стану конструкції ЗК у процесі експлуатації

Кожний з означених технічних станів конструкції колій характеризується певною сукупністю кількісних значень її параметрів та якісних ознак. Номенклатура цих параметрів та ознак, а також межі їх допустимих значень визначені діючою нормативно-технічною документацією.

Якщо в процесі експлуатації конструкція ЗК зі стану I переходить у стан II, то ця подія називається пошкодженням колії. У випадку, коли конструкція ЗК зі стану I або II переходить у стан III, тобто у несправний, але частково працездатний стан (з обмеженням швидкості руху поїздів), то ця подія розглядається як часткова відмова у роботі колії. У разі, коли конструкція ЗК зі стану I, II або III переходить у стан IV, тобто у непрацездатний стан, то ця подія являє собою повну відмову у роботі колії.

Прикладом технічного стану I конструкції ЗК з утримання рейкової колії є її оцінка «відмінно» за показниками колієвимірального вагона. Стан II

відповідає відхиленням (відступам) 2-го та 3-го ступенів від норм утримання рейкової колії, тобто такий її стан виходить за межі допусків на улаштування та утримання й штрафується відповідною кількістю балів, але конструкція ЗК при цьому є цілком працездатною (швидкість руху поїздів не обмежується). Стан III з утримання рейкової колії відповідає наявності відхилень (відступів) 4-го ступеня (коли встановлюється обмеження швидкості руху поїздів), а стан IV виникає при появі у рейковій колії відхилень (відступів), через які пропускання поїздів не дозволяється.

У граничний стан V конструкція ЗК переходить, залишаючись частково або повністю працездатною, зі станів II або III.

Технічний стан конструкції колії в цілому та технічний стан будь-якого її елемента – це різні поняття, які оцінюються відповідними показниками. Зумовлюється це тим, що конструкція ЗК в цілому є об'єктом, який ремонтується й відновлюється після відмови в умовах її функціонування, а окремі елементи конструкції належать до об'єктів, які в умовах функціонування не ремонтуються й не відновлюються після відмови, а підлягають заміні на нові (або старопридатні).

Конструкція залізничної колії в процесі експлуатації може перебувати у технічному стані певного виду. При діагностуванні технічного стану колії можна визначити такі групи: повна працездатність $R(1)$; обмежена працездатність $R(2)$ (на ділянці колії рух поїздів здійснюється з обмеженою швидкістю); непрацездатність $R(0)$.

Перехід конструкції ЗК зі стану $R(1)$ у інший (за працездатністю) стан відбувається за схемами, графічні моделі яких наведені на рисунку 1.2.

Модель 1 (рисунок 1.2, а) характеризує плавний (повільний) перехід конструкції ЗК за період часу t_1 з стану $R(1)$ у стан $R(2)$ без досягнення стану $R(0)$. Це притаманно зворотним процесам «старіння», що виникають через затримку виконання на ділянці колії ремонтно-колійної роботи i -го виду. Своєчасне виконання колійної роботи запобігає переходу конструкції ЗК у непрацездатний стан. Модель 2 (рисунок 1.2, б) характеризує подальший розвиток процесу, що розглядався вище, й перехід конструкції ЗК за період часу t_2 зі стану $R(2)$ у стан $R(0)$ (при цьому $t_2 > t_1$). Така ситуація можлива при тривалій затримці виконання ремонтної роботи на ділянці колії, а також у разі зниження несучої здатності підшпальної основи.

Модель 3 (рисунок 1.2, в) характеризує ситуацію, коли перехід конструкції ЗК зі стану $R(1)$ у стан обмеженої працездатності за певний період часу t_3 набуває доволі інтенсивного (стрибкоподібного) характеру, але при цьому стан $R(0)$ не досягається. Такі випадки можливі, наприклад, при підвищених осіданнях колії у період тривалих дощів.

Модель 4 (рисунок 1.2, г) характеризує ситуацію, коли відбувається різкий (стрибкоподібний) перехід конструкції ЗК зі стану $R(1)$ у непрацездатний стан за період часу t_4 , але з подальшим поверненням у стан $R(1)$. Така ситуація можлива, наприклад, при зламі рейки; після виконання на ділянці певної ремонтно-колійної роботи (заміна рейки на нову) конструкція ЗК відновлює свій працездатний стан.

Модель 5 (рисунок 1.2, д) характеризує ситуацію, коли спостерігається раптовий і незворотний перехід конструкції ЗК зі стану $R(1)$ у стан $R(0)$ у момент часу t_5 . Ця модель буває,

наприклад, при неочікуваному руйнуванні насипу земляного полотна під поїздом.

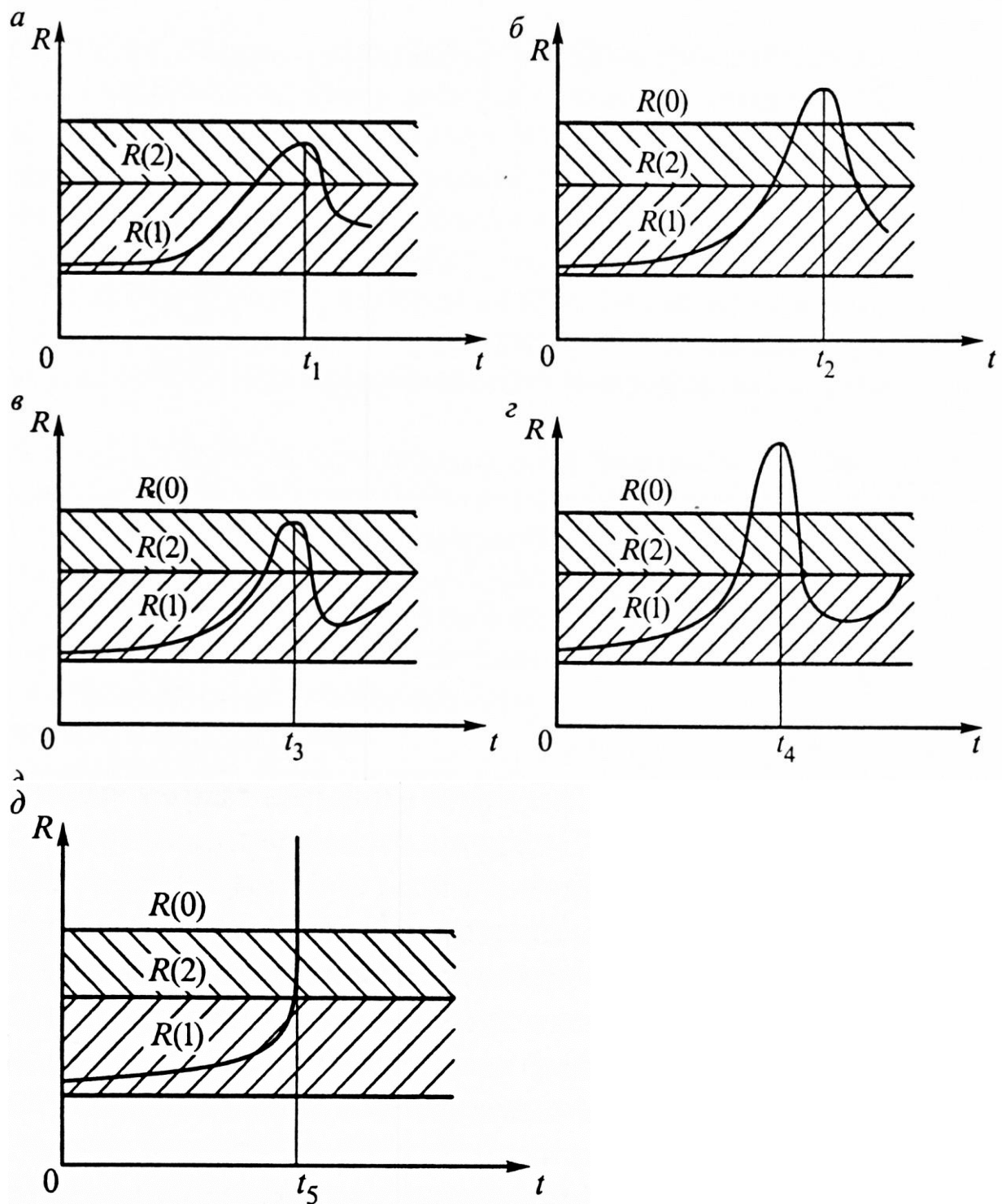


Рисунок 1.2 – Графічні моделі переходу конструкції ЗК з повної працездатності до її іншого виду

У групі «повна працездатність» можна виділити дві підгрупи технічного стану конструкції ЗК:

справний стан – технічний стан колії відповідає всім вимогам діючої документації;

несправний стан – технічний стан колії, при якому вона не відповідає хоча б одній з установлених (діючою документацією) вимог.

У таблиці 1.1 наводяться основні терміни та визначення, які застосовуються для характеристики технічного стану конструкції ЗК.

Таблиця 1.1 – Основні терміни та визначення для характеристики технічного стану колії

Термін	Визначення
1	2
Загальні поняття	
1 Справний стан колії	Стан конструкції ЗК без відступів від установлених норм і допусків на її улаштування та утримання
2 Працездатний стан колії	Стан конструкції ЗК без відступів від норм і допусків на її улаштування та утримання або з відступами від означених норм і допусків, якщо забезпечується безпечний рух поїздів з установленою швидкістю
3 Частково працездатний стан колії	Стан конструкції ЗК з відступами від норм і допусків на її улаштування та утримання, якщо забезпечується безпечний пропуск поїздів з обмеженою швидкістю (місцеве обмеження швидкості руху) Значення параметрів колії, при досягненні яких обмежується швидкість руху поїздів, регламентовані відповідною нормативно-технічною документацією
4 Непрацездатний стан колії	Стан конструкції ЗК, при якому значення хоча б одного параметра, що характеризує здатність безпечно пропускати поїзди, не відповідає вимогам діючої нормативно-технічної документації

Продовження таблиці 1.1

1	2
5 Граничний стан колії	Стан конструкції ЗК, при якому її подальша експлуатація без виконання модернізації колії (МК) (або капітальний ремонт колії (КРК)) недопустима або недоцільна за економічними показниками
6 Напрацювання (напрацьований тоннаж)	Обсяг пропущеного по конструкції ЗК вантажу, млн т бруто, за певний час її експлуатації
7 Довговічність колії	Здатність конструкції ЗК зберігати працездатний стан до появи граничного стану при встановленій системі її поточного утримання та ремонтів
Пошкодження та відмови колії	
8 Пошкодження колії	Подія, що полягає в порушенні справного стану конструкції ЗК при збереженні її працездатності, яка забезпечує безпечний пропуск поїздів з установленими швидкостями
9 Часткова відмова колії	<p>Подія, що полягає у місцевому частковому порушенні працездатного стану конструкції ЗК, у результаті якого виникає потреба у локальному обмеженні швидкості руху поїздів</p> <p>Місце з частковою відмовою огорожується сигналами зменшення швидкості</p> <p>Ознаки і параметри часткових відмов, які потребують огороження сигналами зменшення швидкості, регламентовані відповідною нормативно-технічною документацією</p>

Продовження таблиці 1.1

1	2
10 Повна відмова колії	Подія, що полягає у місцевому повному порушенні працездатного стану конструкції ЗК, у результаті якого виникає потреба у тимчасовому (на період виконання робіт з відновлення працездатного стану) огороженні місця відмови сигналами зупинки Ознаки і параметри повних відмов, які потребують огороження сигналами зупинки, регламентовані відповідною нормативно-технічною документацією
11 Раптова відмова колії	Відмова, яка характеризується стрибкоподібною зміною одного або низки заданих параметрів конструкції ЗК до величини, що перевищує допустиме значення для забезпечення її працездатного стану
12 Поступова відмова колії	Відмова, що виникає внаслідок поступової зміни значень одного або низки заданих параметрів конструкції ЗК до величини, яка перевищує допустиме значення для забезпечення її працездатного стану
13 Виробнича відмова колії	Відмова, що виникає внаслідок порушення встановленого процесу виготовлення (виробництва) конструкції ЗК та її елементів
14 Технологічна відмова колії	Відмова, яка передбачається технологічними процесами виконання колійних робіт з ремонту та поточного утримання конструкції ЗК
15 Технічна відмова колії	Відмова, що виникає внаслідок накопичення в процесі експлуатації залишкових деформацій (утомних і зносових пошкоджень) конструкції ЗК при дотриманні вимог діючих нормативів на її поточне утримання

Продовження таблиці 1.1

1	2
16 Експлуатаційна відмова колії	Відмова, що виникає внаслідок порушення правил експлуатації конструкції ЗК та її поточного утримання
17 Відмови 1-ї групи	Відмови конструкції ЗК, які впливають на процес перевезень (спричиняють затримки або простій поїздів)
18 Відмови 2-ї групи	Відмови конструкції ЗК, які не впливають на процес перевезень (не спричиняють затримок або простою поїздів)
19 Причини відмови	Явища, процеси, події та стани, які обумовлюють появу відмови конструкції ЗК
20 Відмови 1-го типу	Відмови конструкції ЗК, які підлягають прогнозуванню (це технічні та технологічні відмови)
21 Відмови 2-го типу	Відмови конструкції ЗК, які не підлягають прогнозуванню (це виробничі та експлуатаційні відмови, а також відмови, що з'являються внаслідок природних стихійних явищ)
22 Питома кількість відмов	Кількість відмов конструкції ЗК на одиниці її протяжності (на 1 км, 100 км і т.д.); для часткових відмов – на поточний момент часу, для повних відмов – на заданий період часу (або на заданий обсяг напрацьованого тоннажу)
23 Питома протяжність колії з частковими відмовами	Протяжність, км, конструкції ЗК з частковими відмовами на 100 км її довжини (або у відсотках на поточний момент часу)
Показники технічного стану колії	
24 Середнє напрацювання на відмову	Відношення обсягу напрацьованого тоннажу на ділянці колії до кількості відмов конструкції ЗК протягом цього періоду

Продовження таблиці 1.1

1	2
25 Швидкість накопичення відмов колії	Кількість відмов у роботі конструкції ЗК за одиницю часу (за рік, місяць, добу тощо)
26 Повна питома кількість відмов колії	Кількість відмов у роботі конструкції ЗК на одиниці її протяжності протягом періоду між суміжними МК (КРК)
27 Технічний ресурс	Обсяг напрацьованого тоннажу конструкцією ЗК від МК (КРК) до переходу її в граничний стан
28 Призначений ресурс	Обсяг напрацьованого тоннажу конструкцією ЗК від МК (КРК) до моменту, коли повинен бути призначений до виконання її черговий ремонт (комплексно-оздоровчий ремонт колії (КОРК); середній ремонт колії (СРК); МК або КРК)
Функції та умови працездатності колії	
29 Функція накопичення i -го виду пошкодження колії	Функція накопичення i -го виду пошкоджень (дефектів, розладів) конструкції ЗК h_i залежно від обсягу напрацьованого тоннажу T
30 Функція накопичення i -го виду відмови колії	Функція накопичення i -го виду відмов конструкції ЗК N_i залежно від обсягу напрацьованого тоннажу T
31 Функція працездатності колії з обмеження кількості пошкоджень i -го виду	Функція $[h_i]$ - h_i , де $[h_i]$ – допустиме значення (норматив) i -го виду пошкоджень (дефектів, розладів) конструкції ЗК

Продовження таблиці 1.1

1	2
32 Функція працездатності колії з обмеження кількості відмов <i>i</i> -го виду	Функція $[N_i] - N_i$, де $[N_i]$ – допустима кількість (норматив) <i>i</i> -го виду відмов конструкції ЗК
33 Умова працездатності колії за кількістю пошкоджень та відмов <i>i</i> -го виду	$[h_i] - h_i \geq 0$ $[N_i] - N_i \geq 0$

2 НАКОПИЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ ПРИ НАПРАЦЮВАННІ ТОННАЖУ

Технічне обслуговування ЗК передбачає такі етапи:

I – діагностування стану колії;

II – оцінка фактичного стану колії;

III – аналітична модель колії;

IV – прогнозування стану колії;

V – визначення виду ремонтно-колійної роботи;

VI – виконання ремонтно-колійної роботи.

Матеріал цього розділу базується на дослідженнях [2,3].

ЗК як технічна конструкція постійно перебуває під дією рухомого складу та природно-кліматичних умов. Під впливом цих факторів у конструкції колії (в її елементах) з'являються деформації (пружні та залишкові). У процесі експлуатації при напрацюванні тоннажу залишкові деформації поступово збільшуються і виходять за межі установлених допусків до норм утримання ЗК, тобто в конструкції з'являються несправності (розлади, дефекти), які з часом можуть перетворюватися у відмови в роботі колії. Під поїзним навантаженням у підшпальній основі виникають місцеві осідання (відхилення за рівнем, перекося та осідання рейкових ниток), порушується геометрія рейкової колії. З часом при напрацюванні тоннажу розвиваються нерівномірні залишкові деформації колії, які негативно

впливають на умови взаємодії конструкції ВБК та рухомого складу.

Практичний досвід показує, що при поточному утриманні колії роботи з усунення несправностей конструкції у профілі становлять значну частку: при дерев'яних шпалах – 30–50 %, а при залізобетонних – 60–80 % загальних витрат на поточне утримання колії (ПУК).

Після ремонту колії (модернізації, капітального, середнього) відбувається стабілізація її верхньої будови. Якщо за початок відліку напрацьованого на ділянці тоннажу прийняти момент повної стабілізації підшпальної основи (баластового шару) у вертикальній площині, інтенсивність зростання середніх залишкових деформацій колії може бути описана таким рівнянням:

$$f(T) = dH/dT, \quad (2.1)$$

де **H** – середня залишкова деформація колії у вертикальній площині;

T – тоннаж бруто, що пропущений по ділянці після стабілізації колії.

Величина **dH/dT** характеризує швидкість зростання залишкових деформацій колії у міру збільшення обсягу напрацьованого тоннажу на ділянці.

У період після повної стабілізації колії залишкові деформації баластового шару зростають повільно. Тому функцію **f(T)**, яка представляє залежність інтенсивності зростання середніх залишкових деформацій від пропущеного по ділянці тоннажу, можна прийняти лінійного виду:

$$f(T) = 2aT + b. \quad (2.2)$$

Після підстановки виразу (2.2) у рівняння (2.1) одержимо:

$$dH/dT = 2aT + b. \quad (2.3)$$

Розв'язання рівняння (2.3) має такий вигляд:

$$\mathbf{H}(T) = aT^2 + bT + g, \quad (2.4)$$

де g – довільна постійна.

При $T=0$ параметри $\mathbf{H}(0)$ і g теж дорівнюють нулю. Умова $g=0$ відповідає тому, що на момент стабілізації підшпальної основи її залишкові деформації у вертикальній площині відсутні.

Відповідними дослідженнями встановлено, що величина параметра \mathbf{H} міститься в межах 0,6-2,1 мм/100млн т брутто.

Інтенсивність зростання дисперсії залишкових деформацій колії у вертикальній площині може бути описана таким диференціальним рівнянням:

$$\varphi(T) = dD_H/dT, \quad (2.5)$$

де D_H – дисперсія залишкових деформацій колії у вертикальній площині.

Величина dD_H/dT характеризує швидкість зростання дисперсії залишкових деформацій колії у міру збільшення обсягу напрацьованого тоннажу на ділянці.

Якщо функцію $\varphi(T)$ прийняти лінійною (за аналогією з виразом (2.2)), тобто

$$\varphi(T) = 2cT + d, \quad (2.6)$$

то рівняння (2.5) матиме вигляд

$$dD_H/dT = 2cT + d. \quad (2.7)$$

Рівняння (2.7) має таке розв'язання:

$$D_H(T) = cT^2 + dT + e, \quad (2.8)$$

де e – довільна постійна.

Залежність типу (2.8) була запропонована для оцінки спектральної щільності вертикальних нерівностей колії (її

рейкових ниток), що виникають у процесі її експлуатації. Параметр $e = D_H^0$ являє собою дисперсію вертикальних нерівностей колії на момент повної стабілізації підшпальної основи після ремонту колії. Величина коефіцієнтів c та d залежить від низки факторів: середнє напруження у баласті під шпалою (при дії статичного осьового навантаження); дисперсія напружень у баласті; якість баластового матеріалу; товщина баластового шару; стан земляного полотна та його основної площадки; кліматичні умови; рівень технічного обслуговування конструкції колії на ділянці.

Після повної стабілізації колії дисперсія залишкових деформацій її підшпальної основи у вертикальній площині зростає практично прямо пропорційно напрацьованому тоннажу на ділянці. З огляду на це маємо таку залежність:

$$dT = D_H - D_H^0, \quad (2.9)$$

де D_H^0 – дисперсія залишкових деформацій колії у вертикальній площині на момент повної стабілізації підшпальної основи після ремонту.

На величину параметра D_H впливає ряд факторів, серед яких як визначальні розглядаються напруження у баласті під шпалою, що виникають при дії на колію рухомого складу, та дисперсія цих напружень. При цьому функція $\Phi(T)$ може бути подана у вигляді

$$dD_H/dT = A \sigma_{бал}^n - B, \quad (2.10)$$

де A , B , n – постійні величини, що визначаються експериментальним шляхом для конкретних ділянок колії;

$\sigma_{бал}$ – максимальні ймовірні напруження у баласті під шпалою.

Величина B у правій частині рівняння (2.10) ураховує виконання робіт з виправлення колії у профілі.

При відсутності на ділянці колії поточного утримання параметр $B=0$. Якщо прийняти для цього випадку $\sigma_{бал} = \text{const}$ і зінтегрувати рівняння (2.10), отримуємо такий результат:

$$\mathbf{D}_H - \mathbf{D}_H^0 = \mathbf{A} \mathbf{T} \sigma_{\text{бал}}^n. \quad (2.11)$$

Вираз за формулою (2.11) відповідає залежності (2.8) у випадку, коли $\mathbf{c} = \mathbf{0}$, а $\mathbf{d} = \mathbf{A} \sigma_{\text{бал}}^n$.

У разі, коли терміни між двома суміжними виправленнями колії у профілі визначаються певним нормованим параметром $\Delta \mathbf{D} = \mathbf{D}_H - \mathbf{D}_H^0$, то величини $\sigma_{\text{бал}}$ та \mathbf{T} пов'язуються таким співвідношенням:

$$\mathbf{A} \mathbf{T} \sigma_{\text{бал}}^n = \Delta \mathbf{D} = \text{const}. \quad (2.12)$$

Таким чином, якщо на двох ділянках колії (умовно 1 та 2) існують напруження у баласті під шпалою відмінної величини (відповідно $\sigma_{\text{бал}1}$ та $\sigma_{\text{бал}2}$), то обсяги напрацьованого тоннажу, що визначають необхідність виконання на ділянці чергового виправлення колії у профілі (відповідно \mathbf{T}_1 та \mathbf{T}_2), пов'язуються таким співвідношенням:

$$\mathbf{T}_1 / \mathbf{T}_2 = (\sigma_{\text{бал}2} / \sigma_{\text{бал}1})^n. \quad (2.13)$$

Максимальні напруження у баласті під шпалою можна знайти за формулою

$$\sigma_{\text{бал}} = \sigma_{\text{сер}} + 2,5 \sqrt{\mathbf{D}_{\text{бал}}}, \quad (2.14)$$

де $\sigma_{\text{сер}}$ – середні напруження у баласті під шпалами (визначаються за діючою методикою розрахунку конструкції залізничної колії на міцність);

$\mathbf{D}_{\text{бал}}$ – дисперсія напружень $\sigma_{\text{сер}}$ (установлюється емпірично для умов певної ділянки колії).

Таким чином, запропонована математична модель накопичення деформацій колії у вертикальній площині при напрацюванні тоннажу дає змогу визначати прогностичні терміни виконання робіт з виправлення колії у профілі на певних ділянках.

Під дією бокових (поперечних) сил, що передаються від коліс рухомого складу на рейки, у конструкції з'являються місцеві залишкові деформації у горизонтальній площині, тобто порушується геометрія рейкової колії. З часом при напрацюванні тоннажу ці нерівномірні деформації колії розвиваються, рейкові нитки втрачають своє проектне положення у плані.

За свої окресленням на прямих та кривих ділянках колії рейкові нитки набувають хвилеподібного характеру, який з достатньою для практичних цілей точністю може бути віднесений (поза зонами рейкових стиків) до синусоїдального з довжиною хвилі 8-10 м. Зростання залишкових деформацій рейкових ниток у плані при напрацюванні тоннажу негативно впливає на процес взаємодії конструкції верхньої будови та рухомого складу. Це призводить до погіршення умов безпеки та плавності руху поїздів, а також сприяє скороченню строку служби елементів колії.

Своєчасне усунення несправностей конструкції ЗК, що виникають у процесі її експлуатації, здійснюється при ПУК.

Спостереження за роботою конструкції ЗК (безстикова колія; рейкові пліті зварені з рейок типу Р65; проміжне скріплення типу КБ; щебенекий баласт) дали змогу визначити, що:

- середнє значення інтенсивності накопичення залишкових деформацій рейкової колії у плані становить 0,027 м/млн т;
- при зміні експлуатаційних умов на ділянці колії інтенсивність накопичень залишкових деформацій рейкової колії в горизонтальній площині зростає:
 - при підвищенні швидкості (середньоквадратичної) руху поїздів з 13,9 до 16,7 м/с – від 0,013 до 0,03 м/млн т;
 - при збільшенні середньозваженого осьового навантаження рухомого складу зі 120 до 150 кН/вісь – від 0,01 до 0,05 м/млн т.

Після виконання відповідного ремонту спостерігається процес стабілізації ВБК. Якщо за початок відліку напрацьованого на ділянці тоннажу прийняти момент повної стабілізації підшпальної основи (баластового шару), інтенсивність зростання середніх залишкових деформацій рейкової колії у плані може бути описано таким диференціальним рівнянням:

$$f(T) = dN_{гор}/dT, \quad (2.15)$$

де $N_{гор}$ – середня залишкова деформація рейкової колії у горизонтальній площині;

T – напрацьований тоннаж після стабілізації підшпальної основи.

Величина $dN_{гор}/dT$ характеризує швидкість зростання залишкових деформацій рейкової колії у плані у міру збільшення обсягу напрацьованого тоннажу на ділянці.

Досвід експлуатації конструкції ЗК свідчить, що в основний період її роботи (при стабілізованій підшпальній основі) залишкові деформації рейкової колії зростають відносно повільно. Тому функцію $f(T)$ можна описати такою залежністю:

$$f(T) = 2aT+b. \quad (2.16)$$

Після підстановки виразу (2.16) у рівняння (2.15) отримаємо

$$dN_{гор}/dT = 2aT+b. \quad (2.17)$$

Розв'язання рівняння (2.17) має такий вигляд:

$$N_{гор}(T) = aT^2+bT+g, \quad (2.18)$$

де g – довільна постійна.

При $T=0$ параметри $N_{гор}(0)$ і g теж дорівнюють нулю. Умова $g=0$ відповідає тому, що на момент стабілізації підшпальної основи залишкові деформації рейкової колії у горизонтальній площині відсутні.

Дослідженнями встановлено, що на початковому етапі експлуатації конструкції ЗК величина параметра $N_{гор}$ міститься в межах 0,004-0,01 м.

Інтенсивність зростання залишкових деформацій у цьому випадку може бути описана таким диференціальним рівнянням:

$$\varphi(T) = dD_{гор}/dT, \quad (2.19)$$

де $D_{\text{Гор}}$ – дисперсія залишкових деформацій рейкової колії у горизонтальній площині.

Величина $dD_{\text{Гор}}/dT$ характеризує швидкість зростання дисперсії залишкових деформацій рейкової колії у плані зі збільшенням обсягу напрацьованого тоннажу на ділянці.

Якщо функцію $\varphi(T)$ прийняти лінійною (за аналогією з виразом (2.16)), тобто

$$\varphi(T) = 2cT + d, \quad (2.20)$$

то рівняння (2.19) набуває вигляду

$$dD_{\text{Гор}}/dT = 2cT + d. \quad (2.21)$$

Рівняння (2.21) має таке розв'язання:

$$D_{\text{Гор}}(T) = cT^2 + dT + e, \quad (2.22)$$

де e – довільна постійна.

Параметр e являє собою дисперсію горизонтальних нерівностей рейкової колії на момент стабілізації підшпальної основи після ремонту колії. Значення коефіцієнтів c та d залежить від величини напружень у баласті, що виникають при дії бокових сил від коліс рухомого складу на рейки, дисперсії цих напружень, якості баластового матеріалу, виду конструкції ВБК та рівня її технічного обслуговування.

Дисперсія залишкових деформацій стабілізованої підшпальної основи у горизонтальній площині зростає практично прямо пропорційно напрацьованому тоннажу на ділянці. З огляду на це маємо таку залежність:

$$dT = D_{\text{Гор}} - D_{\text{Гор}}^0, \quad (2.23)$$

де $D_{\text{Гор}}^0$ – дисперсія залишкових деформацій рейкової колії у плані на момент стабілізації підшпальної основи після ремонту.

Величина параметра $D_{\text{Нгор}}$ залежить від низки факторів, серед яких визначальними розглядаються напруження у баласті, що виникають при дії бокових сил від коліс рухомого складу на рейки, та дисперсія цих напружень. Отже, функція $\varphi(T)$ може бути подана у вигляді

$$dD_{\text{Нгор}}/dT = A\sigma_{\text{бал}}^n - B, \quad (2.24)$$

де A , B , n – постійні величини, які визначаються експериментальним шляхом для умов певної ділянки колії;

$\sigma_{\text{бал}}$ – максимальні ймовірні напруження, що виникають у баласті (по торцю шпали) при дії бокових сил від коліс рухомого складу на рейки.

Величина B у правій частині рівняння (2.24) враховує виконання робіт з виправлення положення рейкової колії у плані й залежить від контингенту monterів колії на ділянці.

При відсутності на ділянці ПУК параметр $B=0$. Якщо прийняти для цього випадку $\sigma_{\text{бал}} = \text{const}$ і зінтегрувати рівняння (2.24), отримуємо такий результат:

$$D_{\text{Нгор}} - D_{\text{Нгор}}^0 = AT\sigma_{\text{бал}}^n. \quad (2.25)$$

Вираз за формулою (2.25) відповідає залежності (2.22) у випадку, коли $c = 0$, а $d = A\sigma_{\text{бал}}^n$.

Якщо прийняти припущення, що терміни між двома суміжними виправленнями колії у плані (рихтуваннями рейкової колії) визначаються певним нормованим параметром $\Delta D = D_{\text{Нгор}} - D_{\text{Нгор}}^0$, то величини $\sigma_{\text{бал}}$ та T пов'язуються таким співвідношенням:

$$AT\sigma_{\text{бал}}^n = \Delta D = \text{const}. \quad (2.26)$$

Таким чином, якщо на двох ділянках колії (умовно 1 та 2) при інших однакових умовах існують напруження у баласті (по торцю шпали) відмінної величини (відповідно $\sigma_{\text{бал}1}$ та $\sigma_{\text{бал}2}$), то

обсяги напрацьованого тоннажу, що визначають необхідність виконання на ділянці чергового рихтування рейкової колії (відповідно T_1 та T_2), пов'язуються таким співвідношенням:

$$T_1 / T_2 = (\sigma_{\text{бал}2} / \sigma_{\text{бал}1})^n. \quad (2.27)$$

Максимальні напруження у баласті під шпалою можна знайти за формулою:

$$\sigma_{\text{бал}} = \sigma_{\text{сер}} + 2,5\sqrt{D_{\text{бал}}}, \quad (2.28)$$

де $\sigma_{\text{сер}}$ – середні напруження у баласті по торцю шпали (визначаються за діючою методикою розрахунку конструкції ЗК проти дії поперечних сил від рухомого складу);

$D_{\text{бал}}$ – дисперсія напружень $\sigma_{\text{сер}}$ (установлюється емпіричним шляхом для умов певної ділянки колії).

У випадку, коли в правій частині рівняння (2.24) параметр $B \neq 0$, тобто на ділянці виконуються роботи з виправлення рейкової колії у плані при її поточному утриманні, формула (2.25) набуває такого вигляду:

$$D_{\text{Нгор}} - D_{\text{Нгор}}^0 = AT\sigma_{\text{бал}}^n - B. \quad (2.29)$$

Запропонована математична модель накопичення залишкових деформацій рейкової колії може бути застосована при визначенні прогностичних термінів виконання робіт з рихтування рейкової колії на ділянках з певними експлуатаційними умовами.

3 РЕСУРС РЕЙОК ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Ресурс рейок (строк служби рейок (рейкових плітей)) на ділянці залізниці пов'язаний, зокрема, з такими показниками:

- поодинокий вихід (за період експлуатації ВБК) рейок за дефектами (для безстикової колії – кількість дефектних місць у межах рейкової пліті) – m_p , шт/км;

- кількість (як правило, у рік перед заміною колійної решітки) виходу рейок за дефектами – $m_{річ}$, шт/км за рік.

Технічний ресурс рейкових плітей установлюється через визначення надійності їх роботи в процесі експлуатації. Оцінка надійності рейкових плітей безстикової колії в процесі експлуатації передбачає умовний їх поділ на відрізки довжиною 12,5 м (така довжина рейкової вставки, що вварюється у пліть під час остаточного відновлення її цілісності). Рейки зрівнювальних перегонів з розгляду виключаються.

У роботі [4] наведена залежність сумарного поодинокого виходу у дефектні m_p , шт/км, термозміцнених рейок типу Р65 (у межах рейкової пліті) від напрацьованого тоннажу T , млн т бруто (для ділянок із середньозваженим осьовим навантаженням 155 кН та швидкістю руху поїздів 100 км/год):

$$m_p = 0,56 \cdot 10^{-8} T^3. \quad (3.1)$$

Імовірність появи відмов рейок у процесі експлуатації визначається за формулою

$$F_p(t_i) = m_p(t_i) / N_p, \quad (3.2)$$

де N_p – кількість умовних рейок довжиною 12,5 м на 1 км колії.

У наведеному випадку цей показник становить

$$F_p(t_i) = 0,35 \cdot 10^{-10} T^3. \quad (3.3)$$

Інтенсивність появи відмов рейок на ділянці колії відповідає залежності

$$\lambda_p(t_i) = m_p(t_i) / [N_p - m_p(t_i)] \Delta T, \quad (3.4)$$

де ΔT – обсяг напрацьованого тоннажу на інтервалі часу, що розглядається.

У цьому випадку функція $\lambda_p(t_i) = f(T_i)$ описується такою математичною моделлю:

$$\lambda_p(t_i) = 0,35 \cdot 10^{-10} T^4. \quad (3.5)$$

Ця модель є результатом відповідної обробки парних значень λ_p та T на інтервалі $T = 50-750$ млн т брутто.

Перевірка залежності (3.5) за критерієм Фішера підтвердила адекватність установленної моделі.

У таблиці 3.1 наведені результати розрахунків певних показників (при зміні T).

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків

Показник	Значення показника							
	200	300	400	500	600	700	800	900
T , млн т	200	300	400	500	600	700	800	900
m_p , шт/км	0,045	0,151	0,358	0,700	1,21	1,921	2,867	4,586
$F_p(t_i)$	0,0003	0,0010	0,0022	0,0044	0,0076	0,0120	0,0179	0,0255
$1 - F_p(t_i)$	0,9997	0,9980	0,9978	0,9956	0,9924	0,9880	0,9821	0,9745

Можна зазначити таке:

- після напрацювання 800 млн т брутто (розглядається як нормативний тоннаж $T_{\text{норм}}$ для цієї конструкції ВБК) слід очікувати на 1 км колії появи трьох дефектних рейок ($m_p = 2,867$ шт/км) з імовірністю $F_p(t_i) = 0,0179$, імовірність безвідмовної роботи рейкових плітей знижується (від одиниці) до 0,9821, тобто приблизно на 2 %;

- результати розрахунків добре корелюються з раніше виконаними дослідженнями [5], де розглядалася аналогічна конструкція ВБК (пліти з рейок типу Р65, залізобетонні шпали зі скріпленням типу КБ) і визначена ймовірність безвідмовної роботи рейкових плітей (після напрацювання 600 млн т брутто) у 0,9765 (у цьому випадку цей показник дорівнює 0,9924, тобто розбіжність становить 1,6 %).

Останнє підтверджує справедливість застосування залежності (3.1) для визначення величини показника m_p .

Значення $m_p=3$ шт/км розглядається як нижня межа для встановлення ресурсу рейкових плітей за строк служби ВБК.

Для сучасних умов експлуатації встановлено [6] допустимий (з умови економічно-раціональної роботи рейок) рівень сумарного поодинокого виходу рейок у дефектні [m_p] для ділянок з вантажонапруженістю Γ :

$\Gamma=30$ млн. ткм брутто/км за рік - $[m_p]=8$ шт/км;
 $\Gamma=50$ млн. ткм брутто/км за рік - $[m_p]=6,5$ шт/км;
 $\Gamma=80$ млн. ткм брутто/км за рік - $[m_p]=5,6$ шт/км.

Обробка цих даних дала змогу визначити відповідну залежність $[m_p]=f(\Gamma)$, яка описується рівнянням

$$[m_p]=0,0009 \Gamma^2 - 0,147\Gamma + 11,6. \quad (3.6)$$

Таким чином, величина m_p може міститися в межах 3–11 шт/км залежно від параметра Γ .

Досвід експлуатації залізничної колії свідчить, що стан рейкового господарства (на певній ділянці) характеризується двома основними показниками: обсяг напрацьованого тоннажу T ; сумарна кількість виходу рейок у дефектні m_p .

4 ТЕХНІЧНИЙ РЕСУРС ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ

Залізобетонні шпали розглядаються як найбільш надійний та довговічний елемент сучасної конструкції ВБК.

Установлена [4] залежність сумарного виходу залізобетонних шпал за дефектами $m_{\text{шп}}$, шт/км, у процесі експлуатації безстикової колії (з рейковими плітями довжиною 650 м):

$$m_{\text{шп}} = 0,146 \cdot 10^{-5} T^2. \quad (4.1)$$

Імовірність появи відмов шпал (для цієї конструкції ВБК) при напрацюванні тоннажу відповідає

$$F_{\text{шп}}(t_i) = 7,93 \cdot 10^{-10} T^2. \quad (4.2)$$

У свою чергу інтенсивність виходу шпал за дефектами описується залежністю

$$\lambda_{\text{шп}}(t_i) = 0,8 \cdot 10^{-9} T^2. \quad (4.3)$$

У таблиці 4.1 наведені результати розрахунків певних показників (при зміні T).

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків

Показник	Значення показника			
T , млн т	200	300	400	500
$m_{шп}$, т/км	0,052	0,131	0,234	0,365
$F_{шп}(t_i)$	0,00003	0,00007	0,00013	0,00020
$1 - F_{шп}(t_i)$	0,99997	0,99993	0,99987	0,99980

Продовження таблиці 4.1

Показник	Значення показника			
T , млн т	600	700	800	900
$m_{шп}$, т/км	0,526	0,715	0,934	1,183
$F_{шп}(t_i)$	0,00029	0,00039	0,00051	0,00064
$1 - F_{шп}(t_i)$	0,99971	0,99961	0,99949	0,99936

Аналіз результатів, які наведені в таблиці, свідчить, що залізобетонні шпали належать до високонадійних елементів верхньої будови. За розрахунками ймовірність безвідмовної роботи залізобетонних шпал після напрацювання 800 млн т бруто становить 0,9995 (тобто практично не відрізняється від 1,0).

Практичний досвід експлуатації безстикової колії свідчить [7]:

- що загальне вилучення з колії дефектних залізобетонних шпал після пропуску 800 млн т бруто не перевищує 1 %, а при напрацюванні 1200 млн т бруто становить не більш 1,2 % (від загальної кількості шпал при $T = 0$ млн т бруто);

- у зоні зрівнювальних прольотів вилучення за дефектністю залізобетонних шпал у 3,7 разу перевищує вихід шпал у середній частині рейкових плітей;

- залізобетонні шпали за своїми характеристиками міцності (за умови правильної експлуатації) здатні забезпечити надійну роботу у головній колії протягом напрацювання 1,2-1,8 млрд т бруто.

5 ТЕХНІЧНИЙ РЕСУРС ПРОМІЖНОГО СКРІПЛЕННЯ ТИПУ КБ

Проміжне скріплення типу КБ належить до рангу елементів рейко-шпальної решітки (РШР) з низькими показниками надійності роботи при напрацюванні тоннажу (із середнім ресурсом 350 млн т брутто).

Числові значення ймовірності безвідмовної роботи вузлів скріплення типу КБ при напрацюванні тоннажу встановлені у [8].

У роботі [9] наведені математичні моделі для оцінки:

- імовірності появи відмов проміжного скріплення типу КБ (для конструкції ВБК з епюрою шпал 1840 шт/км) при напрацюванні тоннажу

$$F_{\text{КБ}}(t_i) = 28,3 \cdot 10^{-10} T^3, \quad (5.1)$$

- сумарного виходу за дефектами вузлів проміжного скріплення типу КБ в процесі експлуатації

$$m_{\text{КБ}} = 10,4 \cdot 10^{-6} T^3. \quad (5.2)$$

Інтенсивність відмов вузлів скріплення типу КБ на ділянці колії встановлюється за формулою

$$\lambda_{\text{КБ}}(t_i) = m_{\text{КБ}}(t_i) / N(t_i) \Delta T, \quad (5.3)$$

де $N(t_i)$ – кількість вузлів скріплень без відмови на момент часу t_i .

У цьому випадку функція $\lambda_{\text{КБ}}(t_i) = f(T_i)$ описується такою залежністю:

$$\lambda_{\text{КБ}}(t_i) = 3,5 \cdot 10^{-10} T^{2,4}. \quad (5.4)$$

Ця модель є результатом відповідної обробки парних значень $\lambda_{\text{КБ}}$ та T на інтервалі $T = 100\text{--}600$ млн т брутто, її адекватність підтверджується результатами перевірки за критерієм Фішера.

Результати розрахунків за формулами (5.1) та (5.2) наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунків

Показник	Значення показника						
	100	200	300	400	500	600	700
T , млн т	100	200	300	400	500	600	700
m_{кб} , шт/км	10,4	83,2	280,8	665,6	1300,0	2246,0	3567,0
F_{кб}(t_i)	0,0028	0,0226	0,0764	0,1811	0,3538	0,6113	0,9707
1- F_{кб}(t_i)	0,9972	0,9773	0,9236	0,8189	0,6462	0,3887	0,0297

Аналіз даних таблиці 5.1 дає змогу зазначити таке:

- імовірність безвідмовної роботи скріплення типу КБ на рівні не нижче 0,8 можлива при напрацюванні тоннажу не більше 400 млн т бруто;

- такому обсягу тоннажу відповідає поява відмов у роботі 20 % вузлів скріплення на 1 км колії;

- напрацювання тоннажу понад 400 млн т бруто супроводжується «обвальним» темпом появи відмов у роботі вузлів скріплення, що призводить до різкого зниження рівня надійності колійної решітки.

Такий характер зміни параметра **F_{кб}(t_i)** зумовлений різноресурсністю елементів, які об'єднуються у вузол скріплення (таблиця 5.2). Відмова одного елемента у комплекті суттєво знижує ефективність функціонування вузла скріплення.

Середнє напрацювання (для елементів скріплення КБ) до відмови **T_{ср}** та його середнє квадратичне відхилення **σ_t** наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Параметри **T_{ср}** та **σ_t**

Елемент скріплення	Величина параметра, млн т	
	T_{ср}	σ_t
Підкладки	761	229
Болти клемні	5807	1473
Шайби клемних болтів	2615	926
Болти закладні	1550	382
Шайби закладних болтів	2380	813
Втулки	2106	1029
Прокладки підрейкові	493	101
Прокладки нашпальні	703	197

З цих даних видно, що підрейкові та нашпальні прокладки мають (порівняно з іншими елементами скріплення) відносно невисокий ресурс (для підрейкових $T_{cp}=493$ млн т бруто; для нашпальних $T_{cp}=703$ млн т бруто). Саме вихід з ладу цих елементів порушує поєднану роботу всього вузла скріплення.

Практичний досвід експлуатації колії [10] свідчить, що:

- найслабша ланка (за технічним ресурсом) у конструкції безстикової колії – проміжне скріплення;
- найменш довговічний елемент (скріплення) – амортизаційні прокладки (підрейкові, нашпальні);
- довговічність прокладок така, що їх доводиться повністю замінювати за період до чергового оновлення РШР;
- імовірність безвідмовної роботи вузла скріплення типу КБ до моменту напрацювання 700 млн т бруто не перевищує 0,25.

6 ТЕХНІЧНИЙ РЕСУРС РЕЙКО-ШПАЛЬНОЇ РЕШІТКИ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ

Для визначення технічного ресурсу РШР використовується ймовірність безвідмовної роботи конструкції $P_{РШР}(t_i)$ [11], значення якої у конкретний момент часу t_i (після напрацювання певного тоннажу T_i , млн т бруто) визначаємо за формулою

$$P_{РШР}(t_i) = P_p(t_i) P_{шп}(t_i) P_{скр}(t_i), \quad (6.1)$$

де $P_p(t_i)$, $P_{шп}(t_i)$, $P_{скр}(t_i)$ – імовірність безвідмовної роботи (на момент часу t_i) відповідно рейок, шпал та проміжних скріплень.

На практиці для оцінки надійності j -го елемента у деяких випадках доцільно застосовувати таку характеристику, як імовірність появи його відмови $F_j(t_i)$:

$$F_j(t_i) = 1 - P_j(t_i). \quad (6.2)$$

Оцінка надійності рейкових плітей безстикової колії в процесі експлуатації передбачає умовний їх поділ на відрізки довжиною 12,5 м (така довжина рейкової вставки, що вварюється

у пліть під час остаточного відновлення її цілісності). Рейки зрівнювальних перегонів з розгляду виключаються.

Сумарний поодинокий вихід у дефектні m_p , шт/км, термозміцнених рейок типу Р65 (у межах рейкової пліті) від напрацьованого тоннажу T , млн т бруто (для ділянок із середньозваженим осьовим навантаженням 155 кН та швидкістю руху поїздів 100 км/год) визначається за формулою (3.1), а ймовірність появи відмов рейок у процесі експлуатації відповідає залежності (3.3).

Сумарний вихід залізобетонних шпал за дефектами $m_{шп}$, шт/км, у процесі експлуатації безстикової колії (з рейковими плітями довжиною 650 м) устанавлюється за формулою (4.1), а ймовірність появи їх відмов при напрацюванні тоннажу описується залежністю (4.2).

Раніше (дивись розділ 5) встановлені математичні моделі:

- для імовірності появи відмов проміжного скріплення типу КБ (епюра шпал 1840 шт/км) при напрацюванні тоннажу (формула (5.1));

- сумарного виходу за дефектами вузлів проміжного скріплення типу КБ в процесі експлуатації (формула (5.2)).

У таблиці 6.1 наведені значення показників $P_p(t_i)$, $P_{шп}(t_i)$ та $P_{скр}(t_i)$ залежно від T для випадку, коли на ділянці (1 км колії) не виконуються роботи із заміни непридатних шпал та елементів скріплень).

Таблиця 6.1 – Значення $P_{РШР}(t_i)$ при T_i

Показник	Значення показника			
	100	200	300	400
T , млн т				
$P_p(t_i)$	0,99996	0,99972	0,99905	0,99776
$P_{шп}(t_i)$	0,99999	0,99997	0,99993	0,99987
$P_{скр}(t_i)$	0,9972	0,9774	0,9236	0,8189
$P_{РШР}(t_i)$	0,9972	0,9771	0,9227	0,8170

Продовження таблиці 6.1

Показник	Значення показника			
	500	600	700	800
T , млн т	500	600	700	800
$P_p(t_i)$	0,99562	0,99244	0,98700	0,98208
$P_{шп}(t_i)$	0,99980	0,99972	0,99961	0,99949
$P_{скр}(t_i)$	0,6462	0,3887	0,0293	-
$P_{РШР}(t_i)$	0,6432	0,3857	0,0289	-

Аналіз результатів розрахунку свідчить, що ймовірність безвідмовної роботи РШР (для прийнятих умов поточного утримання конструкції колії) після напрацювання 400 млн т бруто знижується до критичного рівня й становить 0,8.

У таблиці 6.2 наведені значення вказаних показників (залежно від T) для випадку, коли на ділянці (1 км колії) виконуються роботи із заміни непридатних елементів скріплень.

Таблиця 6.2 – Значення $P_{РШР}(t_i)$ при T_i

Показник	Значення показника			
	100	200	300	400
T , млн т	100	200	300	400
$P_p(t_i)$	0,99996	0,99972	0,99905	0,99776
$P_{шп}(t_i)$	0,99999	0,99997	0,99993	0,99987
$P_{скр}(t_i)$	0,9972	0,9774	0,9236	0,8189
$P_{РШР}(t_i)$	0,9972	0,9771	0,9227	0,8170

Продовження таблиці 6.2

Показник	Значення показника			
	500	600	700	800
T , млн т	500	600	700	800
$P_p(t_i)$	0,99562	0,99244	0,98700	0,98208
$P_{шп}(t_i)$	0,99980	0,99972	0,99961	0,99949
$P_{скр}(t_i)$	0,9236	0,8189	0,9236	0,8189
$P_{РШР}(t_i)$	0,9194	0,8125	0,9112	0,8038

Аналіз результатів розрахунку, які наведені у таблиці 6.2, указує на позитивний вплив робіт зі своєчасної заміни дефектних елементів проміжного скріплення. При цьому зберігається достатній рівень працездатності РШР у межах ремонтного циклу.

7 ПОКАЗНИКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЩЕБЕНЕВОГО БАЛАСТУ ПРИ НАПРАЦЮВАННІ ТОННАЖУ

Досвід експлуатації залізничної колії свідчить, що баластовий шар найбільш схильний до впливу динамічної дії рухомого складу. При цьому виникають нерівномірні його осідання, знос зерен щебеню, забрудненість баластової призми і, як наслідок, виплески баласту. Тому строк служби щебеневого баласту значно менший порівняно зі строком служби рейок та залізобетонних шпал.

Протягом «життєвого» циклу ВБК технічний стан баластового шару постійно змінюється: перший етап – стабілізація баласту після виконання ремонту колії (характеризується відносно інтенсивними осіданнями баластового шару за рахунок ущільнення баласту під поїзним навантаженням); другий етап – період стабільної роботи баласту (спостерігається зниження інтенсивності накопичення у ньому залишкових деформацій, що обумовлюється досягненням граничного рівня ущільнення баласту під час його першого етапу експлуатації); третій етап – період погіршення технічного стану баластового шару (через підвищення рівня забрудненості баласту зростає інтенсивність нерівномірності його осідання, з'являються виплески баласту, як правило, у зонах стикових з'єднань конструкції колії).

Таким чином, працездатність баласту на третьому етапі його експлуатації негативно впливає на технічний стан конструкції ВБК у цілому. Тому відповідними нормативними документами передбачається, що баластовий шар на завершальному (третьому) етапі його експлуатації підлягає оздоровленню шляхом суцільного очищення від забруднювачів та ліквідації (за необхідності) виплесків баласту.

До показників, які характеризують граничний технічний стан баластового шару, належать: рівень забрудненості щебеневого баласту; протяжність виплесків баласту на 1 км колії (кількість шпал на 1 км колії у зоні виплесків).

У процесі експлуатації ВБК баластова призма поступово забруднюється внутрішніми (через знос зерен щебеню під динамічним навантаженням рухомого складу) та зовнішніми (частка сипких вантажів, що перевозяться по ділянці через

неповну герметичність вагонів потрапляє у баласт) забруднювачами, а з часом (після напрацювання певного обсягу тоннажу) на локальних місцях колії (як правило, у зонах стиків) з'являються виплески баласту. Виплески починають з'являтися після того, як забрудненість баласту досягне певного рівня, через що він (баласт) втрачає свої дренажні властивості, тобто атмосферна вода, яка потрапляє у баласт, не відводиться за межі баластової призми. Практичний досвід свідчить, що виплески баласту виникають насамперед у зоні зрівнювальних перегонів, де спостерігається підвищена дія рухомого складу на конструкцію колії, і, як наслідок, більш інтенсивна робота елементів ВБК, зокрема й баласту.

Залежності, що характеризують рівень забрудненості щебеневого баласту $q_{\text{забр}}$ (відсоток від маси щебеню) та кількості шпал у зоні виплесків $m_{\text{випл}}$ (шпал на 1 км колії), у процесі експлуатації ВБК (рейкові пліти зварені з рейок типу Р65; залізобетонні шпали; щебеневи баласт) мають такий вигляд [12]:

$$q_{\text{забр}} = 3,148 \cdot T^{0,33}; \quad (7.1)$$

$$m_{\text{випл}} = 1,6 \cdot 10^{-6} T^3, \quad (7.2)$$

де T – напрацьований тоннаж, млн т бруто.

Імовірність появи виплесків щебеневого баласту при напрацюванні тоннажу можна знайти за формулою [13]

$$F_{\text{випл}}(t_i) = m_{\text{випл}}(t_i) / N_{\text{еп}}, \quad (7.3)$$

де $m_{\text{випл}}(t_i)$ – кількість виплесків у момент часу t_i ;
 $N_{\text{еп}}$ – епюра шпал.

З урахуванням формули (7.2) для конструкції безстикової колії (при $N_{\text{еп}} = 1840$ шпал/км) маємо

$$F_{\text{випл}}(t_i) = 8,7 \cdot 10^{-10} T^3. \quad (7.4)$$

Інтенсивність появи виплесків баласту на ділянці колії встановлюється за формулою

$$\lambda_{\text{випл}}(t_i) = m_{\text{випл}}(t_i) / N(t_i)\Delta T, \quad (7.5)$$

де $N(t_i)$ – кількість шпал без виплесків баласту на момент часу t_i ;

ΔT – обсяг напрацьованого тоннажу на інтервалі часу, що розглядається.

У цьому випадку функція $\lambda_{\text{випл}}(t_i) = f(T_i)$ описується такою математичною моделлю:

$$\lambda_{\text{випл}}(t_i) = 4,3 \cdot 10^{-10} T^{2,14}. \quad (7.6)$$

Ця модель є результатом відповідної обробки парних значень $\lambda_{\text{випл}}$ та T на інтервалі $T=50-700$ млн т бруто.

Перевірка залежності (7.6) за критерієм Фішера підтвердила адекватність установленної моделі.

За розрахунками гранична кількість виплесків щебеневого баласту на 1 км безстикової колії у 3 % (від N_{en}) та 15 % (від N_{en}) очікується при напрацюванні відповідно 330 та 560 млн т бруто з імовірністю появи відповідно 0,03 та 0,15.

У таблиці 7.1 наведені деякі результати розрахунків за означеними формулами.

Таблиця 7.1 – Розрахункові значення $q_{\text{забр}}$ та $m_{\text{випл}}$

Показник	Напрацьований тоннаж, млн. т бруто					
	200	300	400	500	600	700
$q_{\text{забр}}$	18	21	23	25	27	28
$m_{\text{випл}}$	12,8	43,2	102,4	200,0	345,6	548,8

Відповідна обробка цих даних дала змогу встановити взаємозв'язок між $q_{\text{забр}}$ та $m_{\text{випл}}$ на певному етапі експлуатації колії ($T=200-700$ млн т)

$$q_{\text{забр}} = 19,2 + 0,04 m_{\text{випл}}. \quad (7.7)$$

При цьому наявні такі показники апроксимації: коефіцієнт кореляції – 0,98; коефіцієнт детермінації – 0,96; середня помилка апроксимації – 2,25 %.

8 ТЕХНІЧНИЙ РЕСУРС ВЕРХНЬОЇ БУДОВИ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ

Для оцінки надійності верхньої будови безстикової колії використовується ймовірність безвідмовної роботи конструкції $P_{ВБК}(t_i)$, значення якої визначається у конкретний момент часу t_i (після напрацювання певного тоннажу T_i , млн т бруто) за формулою

$$P_{ВБК}(t_i) = P_p(t_i) \cdot P_{шп}(t_i) \cdot P_{скр}(t_i) \cdot P_{бал}(t_i), \quad (8.1)$$

де $P_p(t_i)$; $P_{шп}(t_i)$; $P_{скр}(t_i)$; $P_{бал}(t_i)$ – ймовірність безвідмовної роботи (на момент часу t_i) відповідно рейок, шпал, проміжних скріплень та баластового шару (див. розділи 3-5, 7).

Ці показники $P_j(t_i)$ встановлені для найбільш поширеної на головних коліях залізниць конструкції ВБК (безстикова колія, рейкові пліті зварені з термозміцнених рейок типу Р65, залізобетонні шпали з епюрою $N_{еп} = 1840$ шт/км, проміжне скріплення типу КБ, щебеневий баласт).

Після виконання відповідних розрахунків встановлена математична модель функції $P_{ВБК}(t_i) = f(F_p(t_i), F_{шп}(t_i), F_{КБ}(t_i), F_{випл}(t_i))$:

$$P_{ВБК}(t_i) = -2,7 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,5 \cdot 10^{-3} T + 0,99. \quad (8.2)$$

Адекватність моделі підтверджена результатами перевірки за критерієм Фішера. Область застосування залежності (8.2) міститься в межах від 0 до 700 млн т бруто.

9 ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ НА ДІЛЯНЦІ ЗАЛІЗНИЦІ

Рівень технічного стану колії на ділянці залізниці певної протяжності встановлюється за результатами відповідного моніторингу. На поточний момент моніторинг технічного стану залізничної колії здійснюється (реалізується) через відповідну систему.

Основною складовою цієї системи моніторингу є контроль стану рейкової колії вагонами-колієвимірниками, за результатами записів яких визначається рівень технічного стану конструкції ЗК на конкретній ділянці. Для цього застосовується діюча методика оцінювання стану рейкової колії штрафними балами за встановленою шкалою, загальна сума яких (балів) пов'язана з кількістю та розмірами зафіксованих відхилень параметрів рейкової колії від норми.

Такий варіант оцінки технічного стану конструкції ЗК носить певною мірою зрізаний характер, не враховує ряд факторів і тому може передбачати відповідне удосконалення через урахування певних груп втрат, що впливають на загальну ефективність функціонування (експлуатації) конструкції колії на конкретному перегоні.

Процес технічного обслуговування ЗК (для забезпечення її працездатного стану) безпосередньо пов'язаний з появою втрат, що зумовлюються певними причинами, серед яких можна зазначити (для умов конкретної ділянки залізниці) такі:

- недостатній рівень якості виконаних ремонтно-колійних робіт;
- затримки або обмеження швидкості руху поїздів через технічний стан колії;
- потреба у виконанні робіт з поточного утримання конструкції ЗК в процесі її експлуатації.

Такі втрати знижують загальний (підсумковий) рівень ефективності функціонування конструкції колії.

Мінімізація втрат, що впливають на показники роботи при експлуатації будь-яких основних засобів, а до них належить і ЗК як найважливіший технічний елемент інфраструктури залізничного транспорту, може бути досягнута через

упровадження системи загального догляду за основними засобами (Total Productivity Maintenance, ТРМ), яка застосовується за кордоном. Головний принцип системи ТРМ полягає у визначенні та реалізації заходів, що спрямовані на досягнення нульового рівня втрат, які знижують ефективність функціонування основних засобів.

Реалізація вказаного підходу для умов колійного господарства полягає у класифікації за видами можливих втрат, що впливають на ефективність функціонування конструкції ЗК, кількісну оцінку рівня їх значущості та підсумкові показники експлуатаційної роботи конструкції ЗК через деякі безрозмірні коефіцієнти k_i (де i – вид втрат за класифікацією). При цьому приймається, що максимальна величина кожного з цих коефіцієнтів не перевищує одиниці. Значення коефіцієнта $k_i = 1$ свідчить про відсутність втрат i -го виду, а за величиною відхилення коефіцієнта k_i (відносно одиниці) можна встановити рівень впливу втрат цієї групи на підсумковий результат. Загальна ефективність експлуатації основних засобів характеризується підсумковим коефіцієнтом

$$k_{\text{еф}} = \prod_{i=1}^{i=n} k_i \leq 1. \quad (9.1)$$

У цьому випадку втрати, що впливають на рівень ефективності функціонування конструкції ЗК, оцінюються [14] через такі показники:

- коефіцієнт експлуатаційної відповідності (готовності) конструкції колії $k_{\text{функ}}$ (характеризує її здатність виконувати свої функції при конкретних умовах експлуатації);

- коефіцієнт використання технічного ресурсу конструкції колії $k_{\text{техн}}$ (враховує обмеження швидкості руху поїздів за технічним станом ЗК);

- коефіцієнт якості виконання ремонтно-колійних робіт $k_{\text{рем}}$ (відображає якісний стан рейкової колії на ділянці при поточному утриманні конструкції ЗК).

Значення наведених показників розраховуються для умов конкретного перегону залізниці за такими формулами:

$$k_{\text{функ}} = (24 \cdot D - T_{\text{техн}}) / 24 \cdot D, \quad (9.2)$$

де D – кількість днів у розрахунковому місяці;

24 – тривалість доби, год;

$T_{\text{техн}}$ – сумарна тривалість технологічних «вікон», що були надані для виконання ремонтно-колійних робіт на перегоні у розрахунковому місяці, год;

$$k_{\text{техн}} = T_{\text{розр}} / (T_{\text{розр}} + T_{\text{доба}}), \quad (9.3)$$

де $T_{\text{розр}}$ – розрахунковий час руху поїзда з установленою швидкістю на цьому перегоні, хв;

$T_{\text{доба}}$ – збільшення часу руху поїзда на цьому перегоні при наявності обмеження їх швидкості, хв. Величина цього параметра визначається за формулою

$$T_{\text{доба}} = (T_1 + T_2 + \dots + T_D) / D, \quad (9.4)$$

де $(T_1 + T_2 + \dots + T_D)$ – збільшення часу руху поїздів на цьому перегоні при наявності обмеження їх швидкості на кожний день розрахункового місяця, хв;

$$k_{\text{рем}} = (L_{\text{відм}} + 0,7L_{\text{добр}} + 0,4L_{\text{задов}}) / L_{\text{діл}}, \quad (9.5)$$

де $L_{\text{відм}}$; $L_{\text{добр}}$; $L_{\text{задов}}$ – частина перегону, на якій конструкція ЗК утримується відповідно з оцінкою «відмінно», «добре» та «задовільно» км;

$L_{\text{діл}}$ – загальна довжина перегону, км.

Загальний підсумковий коефіцієнт $k_{\text{еф}}$, що характеризує ефективність експлуатації конструкції ЗК на конкретному перегоні, визначається за формулою

$$k_{\text{еф}} = k_{\text{функ}} \cdot k_{\text{техн}} \cdot k_{\text{рем}}. \quad (9.6)$$

Значення коефіцієнта $k_{\text{еф}} = 1$ відповідає ідеальному стану конструкції ЗК на перегоні, коли всі можливі і-го виду втрати, що впливають на показники її роботи, усунені й конструкція ЗК

може функціонувати з максимальною ефективністю. За величиною установлених коефіцієнтів $K_{\text{функ}}$, $K_{\text{техн}}$ та $K_{\text{рем}}$ можна оцінити рівень впливу втрат відповідного виду на загальну ефективність експлуатації конструкції ЗК на конкретному перегоні залізниці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Правила технічної експлуатації залізниць України : затв. наказом Міністерства транспорту України від 10.12.2003 р. № 962. Київ, 2003. 133 с.

2 Штомпель А. М., Шраменко В. П. Математична модель накопичення вертикальних деформацій залізничної колії в процесі експлуатації. *Залізничний транспорт України*, 2010. № 4. С. 58-59.

3 Шраменко В. П., Скорик О. О., Штомпель А. М. Математична модель накопичення залишкових деформацій колії у плані при напрацюванні тоннажу. *Збірник наук. праць*. Харків : УкрДАЗТ, 2011. Вип. 122. С. 261-265.

4 Штомпель А. М., Носенко Б. В., Стомін Т. Ю. Обсяги залізничних перевезень та вихід у дефектні елементів верхньої будови безстикової колії. *Научный взгляд в будущее*. Одесса : Куприенко СВ, 2016. Вып. 2(2), т. 1. С. 72-75.

5 Уразбеков А. К. Оценка работоспособности бесстыкового пути с учетом его старения : автореф. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1984. 22 с.

6 Баль О. М. Підвищення ефективності ведення рейкового господарства за показниками надійності : автореф. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 2008. 25 с.

7 Андреев Г. Е., Лapidус Т. А., Мельков Г. В. Многократное использование элементов путевой решетки с железобетонными шпалами. Москва : Транспорт, 1989. 143 с.

8 Карпущенко Н. И., Тарнопольский Г. И. Надежность железнодорожного пути. Новосибирск : НИИЖТ, 1989. 104 с.

9 Штомпель А. М. Вплив поїзного навантаження на змінення рівня надійності верхньої будови безстикової колії. *Научные труды Sworld*. Вып. 48, т. 1. С. 73-77.

10 Каменский В. Б. Система ведения путевого хозяйства нуждается в корректировке. *Путь и путевое хозяйство*. 2005. № 3. С. 6-8.

11 Штомпель А. М., Смирнова Д. О., Чистякова О. О. Змінення рівня надійності рейко-шпальної решітки безстикової колії при напрацюванні тоннажу. *Научный взгляд в будущее*. Одесса : Куприенко СВ, 2019. Вып. 13, т. 1. С. 92-96.

12 Штомпель А. М., Тертичний В. В., Хоруженко С. В. Працездатність щебеневого баласту в процесі експлуатації безстикової колії. *Збірник наук. праць*. Харків : УкрДАЗТ, 2013. Вип. 135. С. 304-308.

13 Штомпель А. М. Вплив поїзного навантаження на ризик появи виплесків щебеневого баласту залізничної колії. *Sworld Journal*. 2017. № 13. Р. 271-277.

14 Шраменко В. П., Скорик О. О., Штомпель А. М. Оцінка технічного стану конструкції залізничної колії на ділянці залізниці. *Збірник наук. праць*. Харків : УкрДАЗТ, 2010. Вип. 119. С. 178-181.

