

УДК 124.456.7 : 878.9

М. А. АРБУЗОВ<sup>1\*</sup>, Є. В. АРБУЗОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта 10max@ukr.net  
<sup>2\*</sup> СП «Придніпровський центр діагностики», вул. Механічна, 22, 49022, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 34-04-93, ел. пошта rails1600@ukr.net

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВІЗНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ФАКТОРУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

**Анотація.** Перевізний процес залежить від стану технічних систем, що приймають в ньому участь. В той же час задіяні технічні системи залежать від організації перевізного процесу. В роботі розглянуто вплив експлуатаційних параметрів на стан такої технічної системи як залізнична колія. Для вивчення даної проблеми обрана найскладніша на регіональній філії «Львівська залізниця» ділянка колії Славсько-Лавочне-Бескид-Воловець.

Досліджено вплив пропущеного тону, радіусу кривої, поздовжнього ухилу, швидкості та підвищення зовнішньої рейки на бічне зношення голівки рейки. Встановлено, що всі фактори впливові. Але найбільш впливовий – поздовжній ухил, на другому місці – швидкість, на третьому – радіус кривої. Вплив ухилу на підйом виявився більший, ніж вплив ухилу на спуск, в 3,3 рази. Встановлено багатопараметричний математичний закон, що відображає процес бічного зношення голівки рейки в залежності від експлуатаційних факторів. Дана функція дозволяє прогнозувати величину бічного зношення рейки. Значне відхилення фактичного зносу від розрахункового, називають наднормативним зносом.

З аналізу даних регіональної філії «Львівська залізниця» випливає, що 40% кривих ділянок колії з наднормативним зносом знаходяться на ділянці Славсько-Лавочне-Бескид-Воловець.

На перегоні Лавочне-Бескид 1629 км пк9 по непарній колії було обладнано дослідну ділянку колії тензометричними датчиками та прогиномірами, що були встановлені в місця найменшого та найбільшого бічного зношення. Спостерігалось зростання на 34% бокової сили у вагонів, що знаходяться перед локомотивом-штоухачем. Перевищення допустимого значення не було виявлено.

Як показали спостереження на перегоні Лавочне-Бескид, рухомий склад пересувається зі швидкістю 35 км/год. При цьому встановлена швидкість руху вантажних поїздів складає 60 км/год і під час розрахунків приймається як мінімальна вантажна. Тобто присутня недореалізація швидкості. Розрахунки показують, що при цьому скорочується строк служби рейок на 38%.

Також в колії було знайдено злитки металу у формі гребеня колеса та поверхні кочення. Дані злитки, що сформовані з лусок та краплин металу, утворені в результаті надмірного гальмування в перевальних ділянках, що є наслідком великої ваги поїзда та крутих спусків.

В роботі розроблено рекомендації щодо перевізного процесу на ділянках складного плану і профілю.

*Ключові слова:* перевізний процес; фактор експлуатації; зношення рейки

### Вступ

Залізнична колія – це комплекс інженерних споруд на базі рейкової колії, головне призначення якої – забезпечення безперебійного та безпечного руху поїздів зі встановленими швидкостями. Характер перевізного процесу впливає на стан залізничної колії, і навпаки, параметри та технічні характеристики колії визначають допустимі швидкості та осьове навантаження поїздів, а відповідно, і пропускну здатність ділянок та оптимальні маршрути доставки вантажів.

В глобальному сенсі перевізний процес – це сукупність організаційно і технологічно взаємозалежних операцій з перевезення пасажирів та вантажів. З точки зору залізничної колії

перевізний процес – це фактор впливу на технічний стан колії та зокрема на знос рейок, так як вибір маршруту, формування складу поїзда, визначення кількості вагонів та складання графіку руху поїздів визначають частоту та рівень впливу коліс на рейки залізничної колії.

### Основна частина

Об'єкт дослідження – рейки, що експлуатуються у складних умовах.

Мета – дослідити наднормативний знос рейок на ділянках залізничної колії зі складними умовами експлуатації та розробити рекомендації щодо організації перевезення вантажів на таких ділянках.

Маршрут слідування поїзду характеризується планом на профілем напрямку, тобто такими технічними параметрами як радіус  $R$  та поздовжній ухил  $i$ . Формування складу поїздів визначає осьове навантаження та кількість осей, що пропускається по заданому напрямку, тобто визначає пропущений тоннаж  $T$ . Графік руху поїздів базується на часі проходження ділянки колії, тобто на фактичній швидкості руху  $V$ , яка формує горизонтальну силу в залежності від величини підвищення зовнішньої рейки  $h$ .

Аналіз існуючої ситуації щодо інтенсивності бокового зносу рейок проводився по даним служби колії регіональної філії «Львівська залізниця» щодо фактичного бокового зносу рейок типу Р65 в кривих ділянках колії, та даним щодо вилучених рейок типу Р65 за останні 5 років в кривих ділянках колії по причині бокового зношення. Аналіз інтенсивності бокового зносу проводиться для рейок вилучених з колії та рейок, що експлуатуються. По вилучених рейках зручно проводити аналіз кінцевого результату впливу різних факторів, а по рейках, що експлуатуються, зручно досліджувати сам процес такого впливу та встановлювати математичні закони процесу зношення.

Факторний аналіз передбачає визначення рівня впливовості факторів, серед яких розглядався пропущений тоннаж, радіус, швидкість, підвищення та поздовжній ухил. Факторний аналіз проводився окремо для кожного фактору, тобто був застосований однофакторний аналіз. Матриця спостережень включала 7 рівнів фактору. Загальна кількість спостережень 380.

Під час розрахунків визначалося факторне розсіювання, залишкове розсіювання, та розрахункове значення критерію Фішера. Чим більше значення критерію Фішера  $F$ , тим сильніший вплив досліджуваного фактору. Існує критичне значення критерію Фішера  $F_{кр}$ , значення менше якого, показують, що фактор не впливає. За довідковими матеріалами встановлено, що  $F_{кр}=2,15$ . Отже, якщо розрахункове значення критерію Фішера більше за 2,15, то фактор впливає на досліджуваний процес.

В табл. 1 приведено результати розрахунку критерію Фішера.

Таблиця 1

**Результати розрахунку критерію Фішера**

	Фактор впливу				
	тонаж $T$	радіус $R$	швидкість $V$	підвищення $h$	ухил $i$
F	6,8	23,1	38,7	10,2	42,5
%	6	19	32	8	35

Як видно з результатів розрахунку всі значення критерію Фішера  $F$  більше за  $F_{кр}=2,15$ . Отже, всі фактори впливові. Але найбільш впливовий – поздовжній ухил, на другому місці – швидкість, на третьому – радіус кривої. Останній рядок таблиці 1 показує відсоткове значення рівня впливу факторів. Звідки видно, що ухил та швидкість в даному переліку факторів займають більше, ніж по 30% впливу (рис. 1).

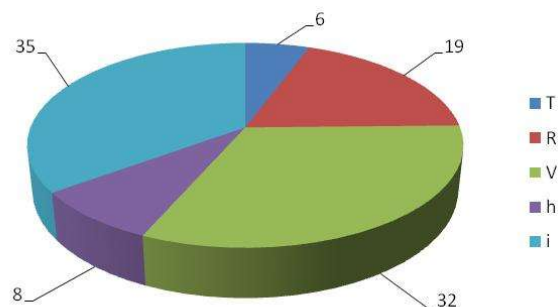


Рис. 1. Розподіл рівня впливу факторів у відсотках

Для встановлення математичних законів процесу зношення проведено інтерполяцію отриманих даних. Отримана математична функція є шуканим математичним законом.

Слід відмітити, що вплив ухилу на підйом виявився більший, ніж вплив ухилу на спуск, в 3,3 рази. Така відмінність викликана режимом руху поїздів та наявністю локомотивів-штовхачів. Даний ефект пояснюється тим, що під час підштовхування вагони стають по відношенню до вісі колії зигзагоподібно, або ще називають положення «ялинкою».

Таким чином, інтегруючи проведений аналіз, можна записати математичну функцію, що глобально відображає процес бічного зношення голівки рейки в залежності від експлуатаційних факторів:

$$z_2 = (100 \arctg(0,1T + 6) - 140,6) \times (-5,76 \ln(R) + 49,49) \times (-0,13V + 22,01)(0,06h + 9,65) \times \begin{cases} (0,29i + 11,51) \text{ підйом} \\ (-0,09i + 9,32) \text{ спуск} \end{cases} \quad (1)$$

де  $T$  – пропущений тоннаж,  $R$  – радіус кривої ділянки колії,  $V$  – швидкість руху поїзда,  $h$  – підвищення зовнішньої рейки,  $i$  – поздовжній ухил ділянки колії.

Отже, підставивши відповідні значення до даного багатопараметричного математичного закону, можна спрогнозувати величину бічного зношення рейки.

В наступному етапі роботи було виявлено ділянки колії з наднормативною інтенсивністю зношення рейки.

Значне відхилення фактичного зносу від розрахункового, що виходить за межі довірчого інтервалу, вказує на порушення нормального закону розподілу, тоді такий знос називається наднормативним. Математичний закон (1) є математичним очікуванням, тобто середнім значенням, а фактичні значення з ймовірністю 0,95 повинні потрапити в інтервал  $\pm 3\sigma$ , де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення.

Процес зношення має нелінійний характер (рис. 2). Класично інтенсивність – це тангенс кута нахилу дотичної  $\alpha$ , але практично колійники користуються кутом  $\beta$ , тобто користуються не приростом значень, а поточними значеннями. Наукові установи використовують класичний підхід і користуються приростом значень. Тому необхідно прийняти єдине правило. Так як класичний підхід вимагає щотижневих замірів, що практично не раціонально, то необхідно користуватися поточними значеннями.

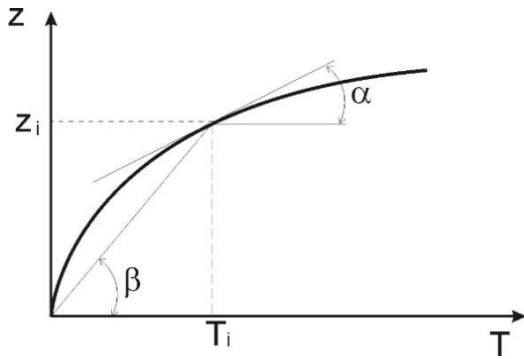


Рис. 2. Схема визначення інтенсивності зносу

Отже, інтенсивність зношення – це відношення фактичного зносу  $z_i$  до фактичного пропущеного тоннажу  $T_i$ .

$$i = \frac{z_i}{T_i} \quad (2)$$

Значне перевищення фактичних значень інтенсивності зношення за розрахункові (1) вказує на те, що крива має понаднормативне зношення і потребує прийняття організаційних, або технічних заходів.

З аналізу даних регіональної філії «Львівська залізниця» випливає, що 40% кривих ділянок колії з наднормативним зносом знаходяться на ділянці Славсько-Лавочне-Бескид-Воловець. Тому саме на цій ділянці було виконано експериментальні дослідження з впливу рухомого складу на колію.

Дослідження бічної сили, що передається від колеса на рейку проведено на перегоні Лавочне-

Бескид 1629 км по непарній колії, де було обладнано дослідну ділянку колії тензодатчиками та прогиномірами, що були встановлені в місця найменшого та найбільшого бічного зношення.

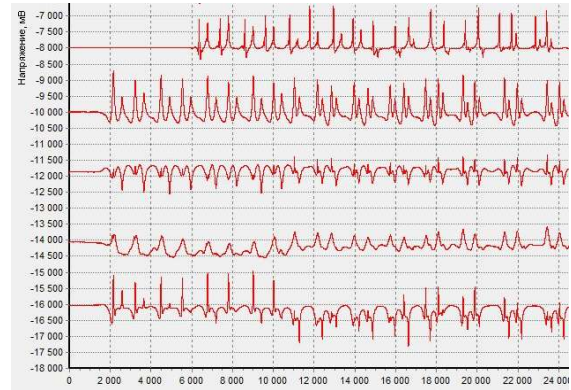


Рис. 3. Запис впливу коліс на колію (перегін Лавочне-Бескид 1629 км)

Здійснювався запис впливу коліс рухомого складу під графіковими поїздами. Поїзди рухалися зі швидкістю 35 км/год. Встановлена швидкість 60/60 км/год. Підвищення зовнішньої рейки 50 мм. Радіус кривої 250 м.

Виміряні напруження не перевищують допустимих значень [1] (табл. 2). Бокові сили та віджимання голівки рейки також знаходяться в межах норми (табл. 3, 4).

Таблиця 2

**Бокова сила в колії перегону Лавочне-Бескид 1629 км пк9, кН**

Заїзд	Середн.	Макс. ймов.	Дисп.	Макс. спос.	Ср. кв. відхил.
1	39,66	52,09	24,71	50,93	4,97
2	41,50	44,00	34,70	51,51	5,89
3	37,45	54,04	44,04	57,07	6,64
4	39,98	40,17	0,01	40,03	0,08
5	30,41	55,49	100,61	64,43	10,03
6	34,27	63,47	136,46	53,42	11,68

Таблиця 3

**Напруження в кромках рейок перегону Лавочне-Бескид 1629 км пк9, МПа**

Заїзд	Середн.	Макс. ймов.	Дисп.	Макс. спос.	Ср. кв. відхил.
1	117,86	146,26	129,08	132,50	11,36
2	119,48	155,72	210,06	140,84	14,49
3	133,47	162,74	137,10	161,04	11,71
4	107,10	113,48	6,50	108,90	2,55
5	128,55	164,50	206,77	156,40	14,38
6	107,74	125,93	52,91	122,30	7,27

Таблиця 4

**Віджимання голівки рейки перегону  
Лавочне-Бескид 1629 км пк9, мм**

Заїзд	Середн.	Макс. ймов.	Дисп.	Макс. спос.	Ср. кв. відхил.
1	2,1	2,8	0,1	2,5	0,3
2	1,6	2,9	0,3	2,3	0,5
3	1,5	2,7	0,2	2,0	0,5
4	1,9	3,1	0,2	2,4	0,5
5	1,1	1,9	0,1	1,9	0,3
6	1,4	1,9	0,1	2,1	0,2

Спостерігається зростання на 34% бокової сили у вагонів, що знаходяться перед локомотивом-штовхачем. Але перевищення допустимого значення не було виявлено.

Як показали спостереження під час досліджень на перегоні Лавочне-Бескид рухомий склад пересувається зі швидкістю 35 км/год. При цьому встановлена швидкість руху вантажних поїздів складає 60 км/год і під час розрахунків приймається як мінімальна вантажна. Тобто присутня недореалізація швидкості. Розрахунки показують, що при цьому скорочується строк служби рейок на 38%.

Крім того було виявлено деякі криві з недопідвищенням зовнішньої рейки. Так крива ділянка непарної колії перегону Лавочне-Бескид 1629 км пк 7 має фактичне підвищення 30 мм, хоча проектне складає 70 мм. Розрахунки показують, що таке недопідвищення подовжує строк служби рейок на 35%.

Під час обстежень непарної ділянки колії перегону Славсько-Лавочне 1626 км пк 8 з наднормативною інтенсивністю бічного зношення рейки встановлено, що під час руху вантажного поїзда колеса половини вагонів не скриплять, а колеса інших вагонів, що знаходяться перед штовхачем, скриплять. Це вказує на те, що вагони перед штовхачем чинять значний боковий вплив на колію.

Збільшення шорсткості поверхні рейки зменшує площину фактичного контакту колеса з рейкою, в результаті чого збільшуються контактні напруження, збільшується інтенсивність зношення рейки. Збільшення шорсткості поверхні рейки на 20 мкм приводить до зменшення зносостійкості на 20-25% [2]. Тому шорсткість поверхні є вагомим фактором у процесі зношення.

Згідно сучасної теорії тертя та зносу, у процесі експлуатації під час ковзання гребенів коліс по бічній грані голівки рейки формується рівноважна шорсткість контактуючих поверхонь.

Тому причиною збільшення шорсткості рейок є колеса рухомого складу. З метою виявлення впливових факторів зношення рейки було виконано обстеження ділянок колії напрямку Славсько-Лавочне-Бескид.

Під час обстеження в колії було виявлено металеву стружку на подошві рейок. Бічна грань при цьому мала значно підвищену шорсткість. Також в колії було знайдено злитки металу у формі поверхні колеса (рис. 4, 5).

Дані злитки сформовані з лусок та краплин металу, що в сукупності повторюють профіль гребеня та поверхні кочення. В результаті надмірного гальмування в перевальних ділянках, що є наслідком великої ваги поїзда та крутих спусків, гальмівні колодки настільки сильно та тривало тиснули на колеса локомотивів, що метал колеса надмірно нагрівся, почав приймати пластичну та рідку форму, став нашаровуватися на колодці і формуватися у злиток. Після відпускання колодок злиток металу випав у колію. Вага злитку сягає по 70 г. Такі злитки розкидані вздовж всього перегону.



Рис. 4. Злиток металу у формі поверхні гребеня колеса (фрагмент №1)



Рис. 5. Злиток металу у формі поверхні кочення колеса (фрагмент №2)

Колесо при цьому втратило метал, отримало пошкодження поверхні вирвами металу. Значно зросла шорсткість. Потім включився процес формування рівноважної шорсткості контактуючих поверхонь [3], і почала зростати шорсткість рейки, почала утворюватися стружка. Зі збільшеною шорсткістю ще й збільшилася інтенсивність зношення. Поперечний профіль зношеної рейки приймає форму колеса локомотива (рис 6, 7). В сукупності утворюється подвійний негативний вплив від такої дії коліс рухомого складу. Саме на цих ділянках і знаходяться криві з наднормативною інтенсивністю бічного зношення рейки.



Рис. 6. Контакт нового колеса локомотива та нової рейки

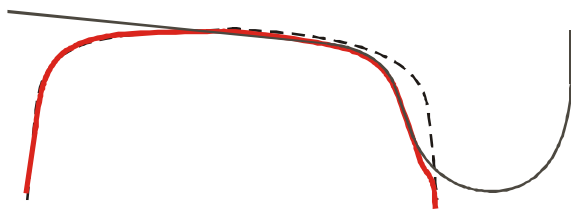


Рис. 7. Контакт нового колеса локомотива та зношеної рейки

Таким чином, для кривих ділянок колії, що працюють в перевальних умовах, необхідно розробити окремі вимоги щодо експлуатації колії. Важливо розрахунок підвищення зовнішньої рейки проводити з урахуванням фактичних швидкостей руху поїздів. Необхідно для таких ділянок передбачити непогашені прискорення пасажирських поїздів  $1 \text{ м/с}^2$  [4], або мінімально допустиму швидкість руху вантажних поїздів [5].

### Висновки

Досліджено вплив експлуатаційних параметрів на процес бічного зношення рейки, і визначено рівень їх впливовості. Величина бічного зносу рейки в першу чергу визначається поздовжнім ухилом, кривизною ділянки та швидкістю руху поїздів, що повинно бути в оптимальному співвідношенні. На напрямку Славсько-Лавочне-Бескид спостерігається висока інтенсивність бічного зношення через неузгодженість даних експлуатаційних параметрів.

Основною причиною наднормативної інтенсивності бічного зношення рейки на напрямку

Славсько-Лавочне-Бескид є велика вагова норма поїздів (більше 6000 т), що породжує збільшену бічну силу, яка передається від колеса на рейку при використанні штовхачів для подолання поздовжнього ухилу (до 30 %), зменшує швидкість руху поїзда та вимагає підсилення піску. Закономірно, що криві з наднормативним зношенням знаходяться перед крутими підйомами, що вказує на вплив режиму руху поїздів при великій ваговій нормі. Велика вагова норма спричиняє надмірну дію і на гальмівні колодки, що пошкоджують гребінь колеса, який в свою чергу значно зношує бічну поверхню рейок. На це вказують виявлені в колії злитки металу у формі гребеня колеса.

Зменшення вагової норми на 25% зменшить інтенсивність зношення бічної поверхні рейок та гребенів коліс в 1,5 рази. Для зменшення інтенсивності бічного зношення рейок необхідно зменшити вагову норму поїздів та вести контроль за її дотриманням. Вага поїзда повинна дозволити долати круті підйоми та круті криві без штовхачів, гальмувати на спусках без перегріву колісних пар. Графік руху поїздів повинен складатися з врахуванням фактичної швидкості руху поїздів, а фактична швидкість поїзда повинна бути не меншою за мінімально допустиму для вантажних поїздів, що регламентовано Інструкцією з улаштування та утримання колії залізниць України ЦП-0269 [5].

### БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ 7571:2014 Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію шириною 1520 мм.
2. Матафонов А.В., Пыко А.Н., Ильиных А.С. Технологическое обеспечение качества поверхности рельсов при шлифовании в условиях железнодорожного пути. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Машиностроение. 2015.
3. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. Минск, 1997. – 12.
4. Правила технічної експлуатації залізниць України, затверджені наказом Міністерства транспорту України від 20 грудня 1996 р. № 411 із змінами і доповненнями, внесеними наказами Міністерства транспорту України: від 8 червня 1998 р. № 226, від 23 липня 1999 р. № 386, від 19 березня 2002 р. № 179.
5. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269. Київ: 2012. – 456 с.

*Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. Губарем О. В. (Україна)*

Надійшла до редколегії 16.10.2020.  
Прийнята до друку 28.10.2020.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА КАК ФАКТОРА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

**Аннотация.** Перевозочный процесс зависит от состояния технических систем, принимающих в нем участие. В то же время задействованные технические системы зависят от организации перевозочного процесса. В работе рассмотрено влияние эксплуатационных параметров на состояние такой технической системы как железнодорожный путь. Для изучения данной проблемы выбрана самая сложная на региональном филиале «Львовская железная дорога» участок пути Славско-Лавочное-Бескид-Воловец. Исследовано влияние пропущенного тоннажа, радиуса кривой, продольного уклона, скорости и возвышения наружного рельса на боковой износ головки рельса. Установлено, что влияют все факторы. Но наиболее влиятельный - продольный уклон, на втором месте - скорость, на третьем - радиус кривой. Влияние уклона на подъем оказалось больше, чем влияние уклона на спуск в 3,3 раза. Установлен многопараметрический математический закон, отражающий процесс бокового износа головки рельса в зависимости от эксплуатационных факторов. Данная функция позволяет спрогнозировать значение бокового износа рельса. Значительное отклонение фактического износа от расчётного, называют сверхнормативным износом. Из анализа данных регионального филиала «Львовская железная дорога» следует, что 40% кривых участков пути со сверхнормативным износом находятся на участке Славско-Лавочное-Бескид-Воловец. На перегоне Лавочное-Бескид 1629 км ПК9 по нечетном пути был оборудован опытный участок пути тензометрическими датчиками и прогибомерами, которые были установлены в места наименьшего и наибольшего бокового износа. Наблюдался рост на 34% боковой силы вагонов, находящихся перед локомотивом-толкателем. Превышение допустимого значения не было обнаружено. Как показали наблюдения на перегоне Лавочное-Бескид, подвижной состав передвигается со скоростью 35 км/ч. При этом установленная скорость движения грузовых поездов составляет 60 км/ч и при расчётах принимается как минимальная грузовая. То есть присутствует недореализация скорости. Расчёты показывают, что при этом сокращается срок службы рельсов на 38%. Также в пути было найдено слитки металла в форме гребня колеса и поверхности катания. Данные слитки, сформированные из чешуек и капель металла, образованы в результате чрезмерного торможения в перевалочных участках, что является следствием большого веса поездов и крутых спусков. В работе разработаны рекомендации относительно перевозочного процесса на участках сложного плана и профиля.

*Ключевые слова:* перевозочный процесс; фактор эксплуатации; износ рельса

М. А. ARBUZOV, E. V. ARBUZOVA

## STUDY OF TRANSPORTATION PROCESS AS A FACTOR OF RAILWAY TRACK OPERATION

**Abstract.** The transportation process depends on the state of the technical systems involved. Technical systems depend on the organization of the transportation process. The paper considers the influence of operational parameters on the condition of the railway track. To study this problem, the most difficult section of the Slavsko-Lavochne-Beskid-Volovets track was chosen at the Lviv Railway regional branch. The influence of the missed tonnage, radius of the curve, longitudinal slope, speed and increase of the outer rail on the lateral wear of the rail head was investigated. It is established that all factors are influential. But the most influential - the longitudinal slope, in second place - speed, in third place - the radius of the curve. The effect of the slope on the rise was greater than the effect of the slope on the descent 3.3 times. A multiparametric mathematical law is established, which reflects the process of lateral wear of the rail head depending on the operational factors. This function allows you to predict the amount of lateral wear of the rail. Significant deviation of actual wear from the calculated, called excessive wear. From the analysis of data of the regional branch "Lviv Railway" it follows that 40% of the curved sections of the track with excessive wear are located on the section Slavsko-Lavochne-Beskid-Volovets. During the Lavochno-Beskid 1629 km pk9 race on the odd track, the test section of the track was equipped with strain gauges and prognometers, which were installed in the places of the smallest and largest lateral wear. There was an increase of 34% in lateral force in the cars in front of the pusher locomotive. No exceedance was detected. Observations at the Lavochne-Beskid race showed that the rolling stock was moving at a speed of 35 km/h. Thus, the established speed of movement of freight trains makes 60 km / h and during calculations is accepted as the minimum freight. That is, there is an under-realization of speed. Calculations show that this reduces the service life of the rails by 38%. Metal ingots in the shape of a wheel crest and a rolling surface were also found in the track. These ingots, formed from scales and drops of metal, are formed as a result of excessive braking in the pass sections, which is a consequence of the heavy weight of the train and steep descents. The paper develops recommendations for the transportation process in areas of complex plan and profile.

*Keywords:* transportation process; operating factor; rail wear