

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра «Транспортна інфраструктура»

НАЦІОНАЛЬНА ШКОЛА МАЙСТЕРНОСТІ ТА ПРОФЕСІЙ
CNAM, ФРАНЦІЯ

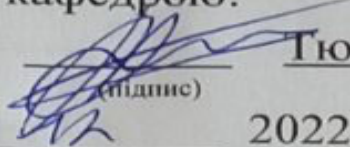
«ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО»

Завідуючий кафедрою:

д.т.н., проф.

(вч. звання, ступінь)

« 15 »



(підпис)

Тютькін О. Л.

(ПІБ)

2022 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

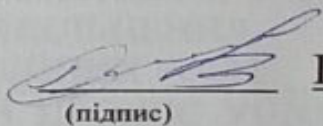
на отримання ОКР «магістр»

Напрямок 27 «Транспорт»

Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

Тема роботи «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

Оцінка ступеню ущільнення щебеневого баласту залізничної колії
при використанні машини ВПО-3000
відповідно до вимог інтероперабельності



(підпис)

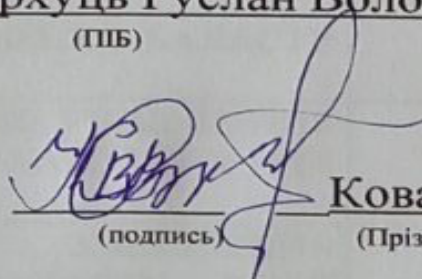
Пархуць Руслан Володимирович

(ПІБ)

Керівник:

д.т.н., доцент

(вч. звання, ступінь)



(підпис)

Ковальчук В. В.

(Прізвище ініціали)

Дніпро
2022

ЗАЯВА

Я, Марущук Руслан Васильович
(ПІБ повністю)

Студенті групи 8 - Інтер
(шифр групи)

Спеціальності 273 Залізничний транспорт
(код та назва спеціальності)

освітньої програми Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті
(назва освітньої програми)

освітнього ступеня підготовки магістр
(бакалавр, магістр)

Заявляю, що моя випускна кваліфікаційна робота на тему:

Рівня електричного опору при виконанні машини ВПО 3000
відносно до вимог інтероперабельності

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел мають відповідні посилання.

Прошу перевірити її на наявність академічного плагіату.

Я ознайомена з чинним «Порядком перевірки кваліфікаційних випускних робіт здобувачів вищої освіти на виявлення текстових та графічних запозичень засобами перевірки на плагіат», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску випускної кваліфікаційної роботи до захисту.

Дата 21.11.2022р.

Підпис

Керівник

Ковальчук ВР

Підпис

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра «Транспортна інфраструктура»

НАЦІОНАЛЬНА ШКОЛА МАЙСТЕРНОСТІ ТА ПРОФЕСІЙ
CNAM, ФРАНЦІЯ

«ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО»

Завідуючий кафедрою:

Д.Т.Н., проф. _____ Тютюкін О. Л.
(вч. звання, ступінь) (підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2022 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

на отримання ОКР «магістр»

Напрям 27 «Транспорт»

Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

Спеціалізація «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

Тема **Оцінка ступеню ущільнення щебеневого баласту залізничної колії при**
використанні машини ВПО-3000
відповідно до вимог інтероперабельності

Виконав:

_____ Пархуць Руслан Володимирович
(підпис) (ПІБ)

Керівник:

Д.Т.Н., доцент _____ Ковальчук В. В.
(вч. звання, ступінь) (підпис) (Прізвище ініціали)

Дніпро
2022

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		1

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І СЛОВНИК ТЕХНІЧНИХ ТЕРМІНІВ

РШР	Рейко-шпальна решітка.
ВПО-3000	Виправочно-підбивачна-обробна машина.
НДС	Напружено-деформований стан.
МКЭ	Метод кінцевих елементів.
ТСІ	Технічні специфікації інтероперабельності.
EN	Європейські стандарти.
АСУ	Автоматизована система керування.
ДСП	Динамічний стабілізатор колії.
ПБ	Планувальник баласту.
Баластна призма	Елемент верхньої будови колії із баласту, що укладається на земляне полотно для стабілізації рейково-шпальної решітки при дії динамічних навантажень від рухомого складу.
Баласт (ballast)	Мінеральний сипкий матеріал для верхньої будови колії (баластної призми) у залізничному колійному господарстві.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ УКРАЇНИ І ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ДО ОЦІНКИ СТУПЕНЮ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ ПРИ ВИКОНАННІ КОЛІЙНИХ РОБІТ	7
1.1. АНАЛІЗ РОБОТИ БАЛАСТНОГО ШАРУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	7
1.2. АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ТА НЕДОЛКІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА БАЛАСТІ	9
1.3. ВИПРАВЛЕННЯ КОЛІЙ В ПЛАНІ НА ЩЕБЕНЕВОМУ БАЛАСТІ.....	10
1.4. КОНСТРУКЦІЯ БАЛАСТНОЇ ПРИЗМИ ТА ВИМОГИ ДО БАЛАСТНИХ МАТЕРІАЛІВ	11
1.5. РОБОТА БАЛАСТУ ПРИ ВПЛИВІ ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	14
1.6. АДАПТАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ СТАНУ БАЛАСТУ УКРАЇНСЬКИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ДО КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ	20
Висновки до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ МАШИНОЮ ВПО-3000	23
2.1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТНОЇ ПРИЗМИ	23
2.2. ТЕХНОЛОГІЯ РОБОТИ МАШИНИ ВПО-3000 ПРИ УЩІЛЬНЕННІ БАЛАСТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	26
2.3. РОБОЧІ ОРГАНИ ВИПРАВНО-ПІДБИВАЮЧИХ МАШИН ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ДІЇ	31
Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ МАШИНОЮ ВПО-3000 У ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ....	34
3.1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ SASW І MASW ПРИ УЩІЛЬНЕННІ ЩЕБЕНЕВОГО БАЛАСТУ	34

					0041.216529.ДР.2022.001			
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Оцінка ступеню ущільнення щебеневого баласту залізничної колії при використанні машини ВПО-3000 відповідно до вимог інтеперабельності	Літ	Лист	Листів
Розробив	Пархуць Р.В.							
Перевірів	Ковальчук В.В.							
Н. контр.								
Затвердив	Тютюкін О.Л.							

3.2. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХВИЛЬ УДАРУ SASW (SPECTRAL ANALYSIS SURFACE WAVES)	35
3.3. МЕТОД БАГАТОКАНАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ MASW (MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES).....	37
3.4. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЮ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ МАШИНОЮ ВПО-3000	38
3.5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТУПЕНЮ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ ПРИ РОБОТІ ПРОТОТИПУ МАШИНИ ВПО-3000	43
3.6. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ УДАРУ	
Висновки до розділу 3	45

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ІЗ ЗМЕНШЕННЯ РОЗЛАДНАННЯ ЩЕБЕНЕВОГО БАЛАСТУ

КОЛІЇ ПІСЛЯ РОБОТИ МАШИНИ ВПО-3000	46
4.1. МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ СИЛ ТИСКУ НА БАЛАСТНИЙ ШАР ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ	46
4.2. ВПЛИВ ПІДБИВКИ БАЛАСТУ НА РОЗЛАДНАННЯ ГЕОМЕТРІЇ КОЛІЇ	47
Висновки до розділу 4	55

ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ЛІТЕРАТУРА	57
СПИСОК РИСУНКІВ	62
СПИСОК ТАБЛИЦЬ.....	65
АНОТАЦІЯ І КЛЮЧОВІ СЛОВА.....	66

ВСТУП

Інтеграція України у Європейський Союз базується на угоді про партнерство та План дій у рамках Європейської політики сусідства. Одним із нагальних питань залишається приведення вимог нормативно-технічної бази України відповідно до вимог ЄС.

Згідно вимог Європейських вимог (Директиви 2016/797) елементи інфраструктури залізничної колії повинні протягом гарантійного терміну напруцювання експлуатуватися без відмов у роботі. Відповідати вимогам нормативних документів затверджених у встановленому порядку правил, утримання відповідних об'єктів такої інфраструктури.

Відповідно до вимог ТСІ, при забезпеченні терміну «безпечний стан залізничного транспорту», мається на увазі забезпечення інфраструктури технічними, технологічними, організаційними та кваліфікаційними параметрами.

Для забезпечення стабільної роботи залізничної колії виконується багато різних робіт. Одними із робіт є підбивка та ущільнення баластної призми. Це дозволяє привести колію до норм утримання. Проте при виконанні підбивки баласт пошкоджується, що призводить до зменшення довговічності його експлуатації в колії.

Для підбивки баласту на колії використовуються два методи. Це підбивка баласту машиною ВПО-3000 та машинами Plasser&Theurer. Машина ВПО-3000 підбиває баласт у горизонтальній площині, а машини Plasser&Theurer, це вертикально-горизонтальна технологія, яка використовується на залізницях Європейського Союзу та України.

Актуальність теми. Основним недоліком роботи машини Plasser&Theurer є пошкодження щебеневого баласту колії при вертикальному навантаженні робочими органами машини. Високе руйнування та багаторазове підведення баласту призводить до необхідності дорогого очищення, а відповідно і частоті виправки геометрії залізничної колії.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		5

При роботі машини ВПО-3000, баласт підбивається клиноподібними вібраційними плитами. У результаті чого пошкодження баласту є меншим, ніж при використанні технології машин Plasser&Theurer.

Тому питання дослідження ступеню ущільнення баласту залізничної колії відповідно до вимог інтероперабельності, машиною ВПО-3000 є актуальними.

Мета роботи. Метою магістерської роботи є дослідження ступеню ущільнення баласту залізничної колії машиною ВПО-3000 відповідно до вимог інтероперабельності.

Для досягнення вказаної мети у магістерській роботі поставлено такі задачі досліджень:

- виконати аналіз конструкцій колії на щебеневому баласті;
- проаналізувати технологію ущільнення баласту колії машиною ВПО-3000;
- провести експериментальні дослідження ущільнення баласту прототипом машини ВПО-3000 у лабораторних умовах;
- розробити рекомендації, щодо підвищення довговічності баласту в експлуатації.

Об'єкт дослідження – баласт залізничної колії.

Предмет дослідження – ступінь та технологія ущільнення баласту колії машиною ВПО-3000 відповідно до вимог інтероперабельності.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						6
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ УКРАЇНИ І ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ДО ОЦІНКИ СТУПЕНЮ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ ПРИ ВИКОНАННІ КОЛІЙНИХ РОБІТ

1.1. Аналіз роботи баластного шару залізничної колії

Верхня будова залізничної колії має у своїй конструкції баластну призму. Вона складається із піщаної подушки і щебеневого шару, в який занурена рейко-шпальна решітка (РШР). Внаслідок сприйняття навантажень від рухомого складу залізничного транспорту у баластній призмі відбувається накопичення залишкових осадів РШР. При цьому величина залишкових осідань колії залежить від пропущеного тоннажу та технічного стану колії.

На рис. 1.1 наведено графічну залежність накопичення залишкових осідань колії у залежності від пропущеного тоннажу.



Рисунок 1.1 – Графічна залежність осідань колії
від величини пропущеного тоннажу

На рис. 1.1 позначено наступне: h – величина залишкових осідань колії; T_1 – період стабілізації колії після виконання ремонтних робіт; T_2 – період нормальної експлуатації колії; T_3 – період критичної експлуатації колії, при утворенні нерівностей на колії; T_4 – аварійний період роботи колії при перевищенні допустимих норм колії; t – періоди між виправленнями колії; $\Delta h_{\text{зап}}$ – запас на осідання колії.

Із рис. 1.1 видно, що баласт накопичує осідання нерівномірно, це дає можливість виділити кілька періодів роботи колії [1–4].

Протягом першого періоду T_1 відбувається стабілізація колії. Потім осідання баласту через період t поступово йде накопичення осідань протягом всього періоду роботи колії T_2 . При цьому баласт накопичує осідання повільно, оскільки робота баласту стабілізована у першому періоді роботи. Наприкінці терміну експлуатації осідання знову починають інтенсивно накопичуватися. Тут настає період капітального ремонту колії T_3 . Якщо не виконати капітальний ремонт колії відбувається інтенсивне руйнування щебинок баласту, внаслідок чого баласт втрачає свою несучу здатність (період T_4).

Від конструкції та якості баластного шару залежать: загальний стан залізничної колії. При цьому баластний шар повинен:

- приймати тиск від шпал і розподіляти його майже рівномірно на більшу площу земляного полотна;
- забезпечувати стабільне проектне положення рейко-шпальної решітки;
- забезпечувати можливість виправлення колії у плані та профілі;
- відводити воду з баластової призми та з основної площадки земляного полотна;
- брати участь у формуванні оптимальної пружності підрейкової основи при експлуатації колії на дерев'яних та залізобетонних шпалах;
- повинен володіти низькою електропровідністю, що забезпечує нормальну роботу рейкових кіл автоблокування незалежно від кліматичних умов.

Отже, необхідною умовою працездатної роботи рейко-шпальної решітки в умовах експлуатації колії є періодичне виконання робіт по відновленню положення РШР шляхом виправки, ущільнення та стабілізації баластного шару. Ефективним способом досягнення працездатного стану колії є ущільнення баластної призми машинами глибокого очищення ВПО-3000.

При ущільненні баласту відбувається взаємодія двох об'єктів – баластного шару (баласної призми) та ущільнюючими робочими органами колійних машин.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		8

Способи оцінки якості ущільнення баласту колії, після роботи машини ВО-3000, більш детально розглядаються нижче в магістерській роботі.

1.2. Аналіз переваг та недоліків залізничної колії на баласті

Класична колія на ущільненому баластному шарі набула домінуючого застосування на залізницях України та Європейського Союзу [5–9].

Одними із основних переваг колії на баластному шарі є:

- низькі витрати на капітальні роботи та поточне утримання;
- великий термін служби;
- наявність машин і механізмів для ремонту колії на баластному шарі тощо.

Однак щебеневий баласт із розміром частинок від 20 мм до 60 мм, являється слабким місцем при дії на нього динамічного навантаження від рухомого складу залізничного транспорту. Оскільки це призводить до руйнування щебинок баласту, утворення напружень [5, 6].

На рис. 1.2 наведено схему розподілу напружень по вертикальній на елементи колії при дії навантажень від рухомого складу залізниці.

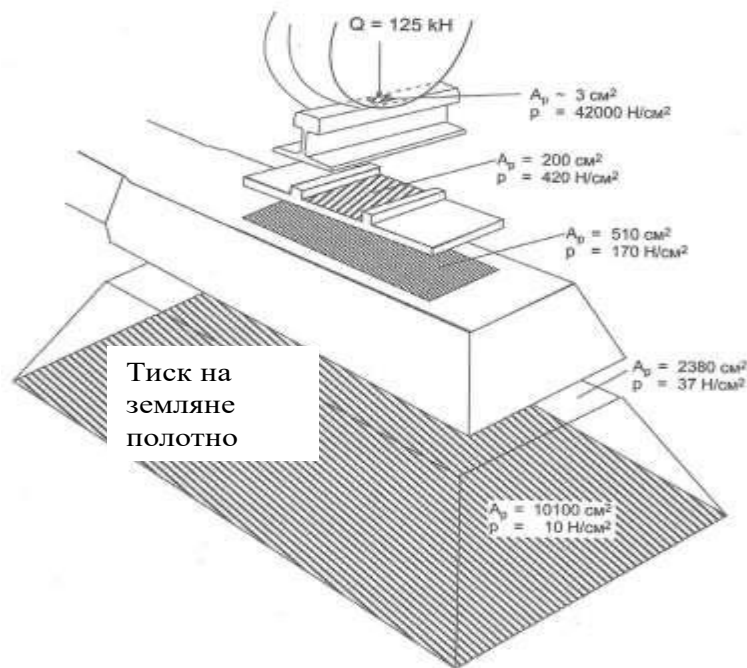


Рисунок 1.2 – Схема розподілу напружень в елементах колії на щебеневому баласті

Отже, баласт має переваги, щодо вартості будівництва колії на баласті. Однак у процесі експлуатації колії на щебеневому баласті необхідно виконувати роботи поточного утримання, для стабільної роботи колії.

Одним із основних чинників впливу на розладнання колії залишається розладнання щебеневого баласту, через недостатній ступінь його ущільнення, наявності пустот тощо.

Для виконання ущільнення баласту колії застосовуються виправочно-підбивочні-рихтовочні машини. Які приводять колію до норм утримання. Важливим фактором забезпечення стабільної роботи колії являється ущільнення баласту до нормативних вимог.

Тому у магістерській роботі проводиться дослідження ступеню ущільнення баласту при роботі машини ВПО-3000.

1.3. Виправлення колії в плані на щебеневому баласті

Вирішальне значення для забезпечення стабільної роботи колії являється забезпечення виправленню колії в плані методом рихтування до нормативних вимог.

Утримання колії в плані залежить від якості матеріалів баластного шару, величини плеча баластної призми, радіусів кривих. Також значний вплив має осьове навантаження рухомого складу залізниць.

Слід зазначити, що при збільшенні швидкостей руху потрібно також підвищувати вимоги до утримання колії в плані. Це актуально в кривих ділянках, де при русі рухомого складу виникають значні бокові сили, які можуть викликати більш інтенсивний знос елементів верхньої будови колії та бандажів коліс, пошкодження рейок, розлади колії.

При поточному ремонті колії велика увага приділяється виправленню колії в плані (рихтування). З метою забезпечення руху поїздів із встановленими швидкостями на заданих ділянках колії.

Допуски при утриманні колії в плані наведено у табл. 1.1. При цьому

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		10

допуски по рихтуванню колії встановлюються для стріл вигину в суміжних точках кривої у залежності від швидкості руху рухомого складу.

Таблиця 1.1 – Допуски утримання колії в плані

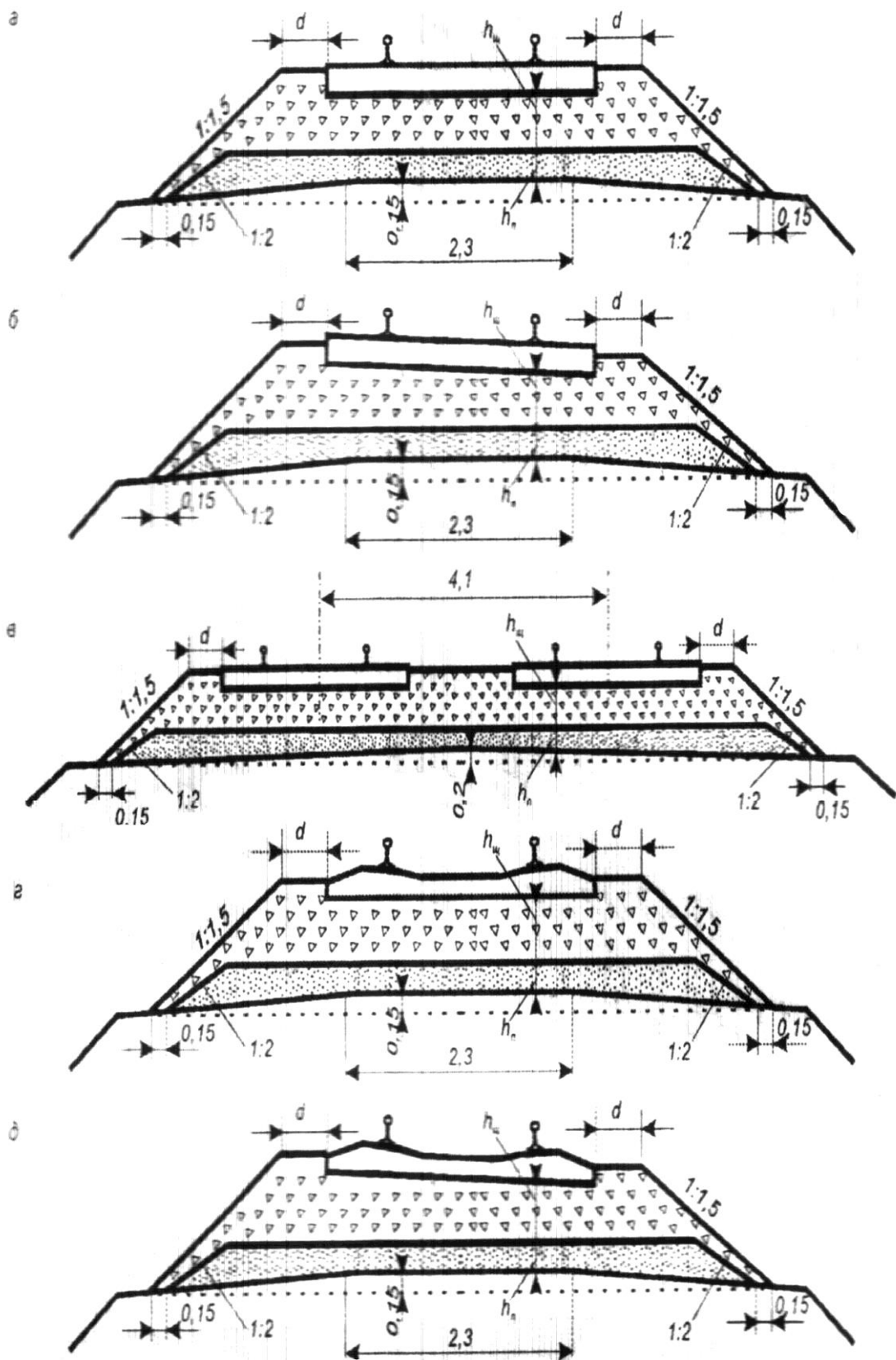
Швидкість руху поїздів пас/вант., км/год	Різниця суміжних стріл вигину, мм, виміряних від середини 20/10 метрової хорди в кругових кривих радіусом, м				Відхилення від рівномірного зростання суміжних стріл вигину, виміряних від середини 20/10 метрової хорди, в перехідних кривих
	на прямій ділянці	більше 650	від 650 до 401	400 і менше	
До 140/100 включно	8/4	8/4	10/5	12/6	6/3

Криві ділянки колії радіусом більше 400 м вимірюють хордою довжиною 20 м, а радіусом менше 400 м вимірюють хордою довжиною 10 м.

1.4. Конструкція баластної призми та вимоги до баластних матеріалів

Баластний шар, являється основою для рейкових опор, укладається на основну площадку земляного полотна залізниці. Він призначений для сприймання тиску від рейкових опор (шпал), та передачі навантаження на основну площадку земляного полотна. Крім цього баластний шар забезпечує стійкість рейко-шпальної решітки, відводить поверхневі та ґрунтові води від верхньої будови колії. Тому для виконання заданих функцій баласт, як матеріал повинен володіти достатніми властивостями міцності, пружності, чинити опір переміщенню рейко-шпальної решітки, бути водостійким та морозостійким.

На залізницях України, у якості баласту використовують щебінь, гравій, сортований гравій, кар'єрний гравій, черепашник, пісок тощо.



Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата

0041.216529.ДР.2022.001

Лист

12

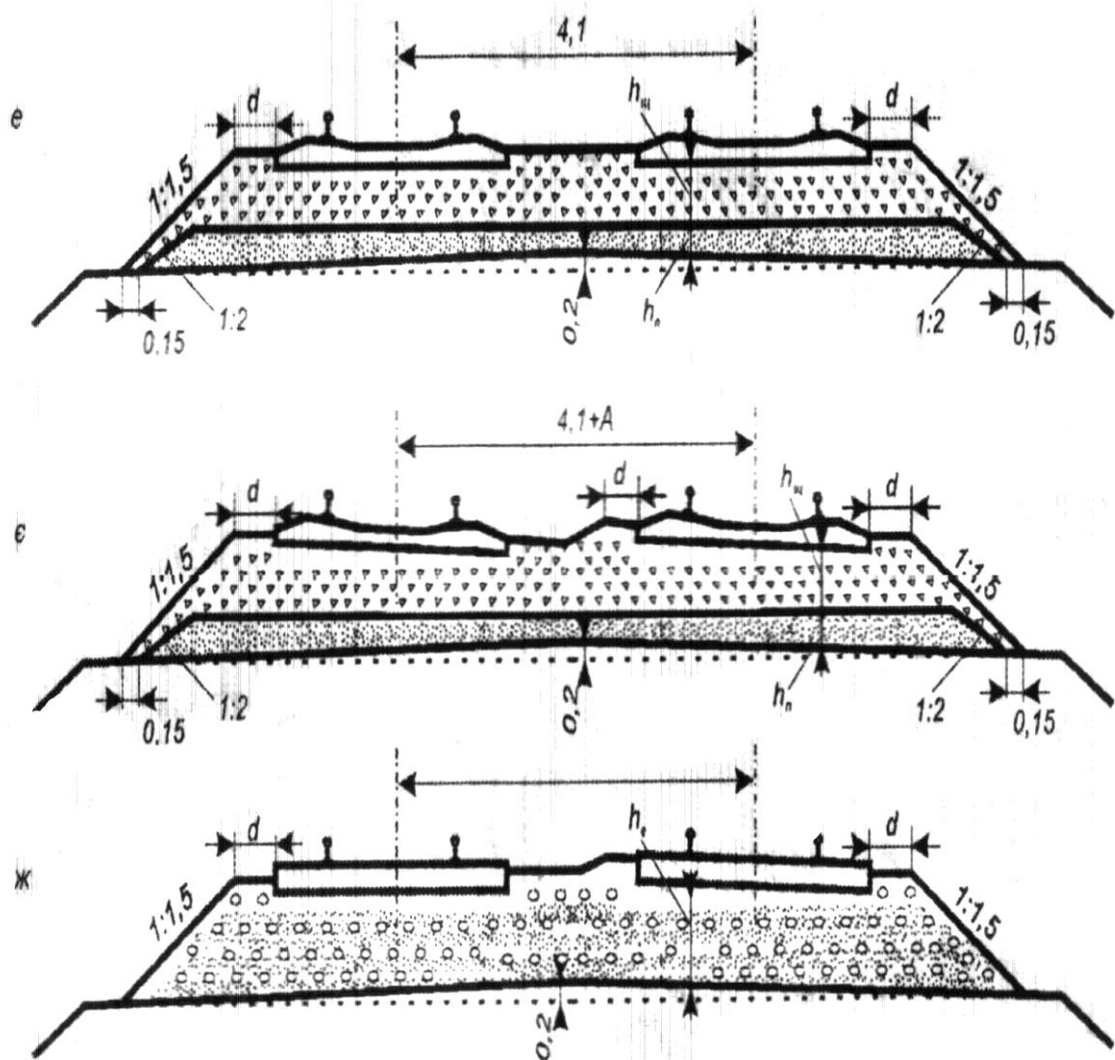


Рисунок 1.3 – Поперечні профілі баластної призми: *а, б, в* – із щебеню при дерев'яних шпалах (*а* – на прямій одноколіній ділянці, *б* – в кривій, *в* – на прямій двоколіній ділянці); *г, д, е, є* – із щебеню при залізобетонних шпалах (*г* – на прямій одноколіній ділянці, *д* – в кривій, *е* – на прямій двоколіній ділянці, *є* – в кривій); *ж* – з кар'єрного гравію, черепашнику, піску при дерев'яних шпалах у кривій на двоколіній ділянці; $h_{ш}$ – товщина щебенювого шару під шпалою; $h_{п}$ – товщина шару піщаної подушки; d – плече баластної призми; A – розширення міжколійя в кривій за умовами габариту [10]

Як показав досвід експлуатації колії на щебеновому баласті із твердих кам'яних порід, найкращим матеріалом являється щебінь. Щебеновий баласт виготовляють фракцій із розмірами зерен 25–60 мм. При обґрунтуванні рішень, може укладатися дрібний щебінь фракцій розміром 5–25 мм на піщаній подушці.

Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата

0041.216529.ДР.2022.001

Лист

13

Слід зазначити, що щебінь чинить найбільший опір зсуву шпали у порівнянні із іншими матеріалами, характеризується пружними та дренуючими властивостями, і є більш довговічним.

На ділянках залізничної колії, на яких швидкість руху поїздів понад 100 км/год рекомендується застосування щебеневого баласту. Конструкція баластного шару може бути одношарова або двошарова у залежності від експлуатаційних умов колії. Товщина щебеневого баластного шару і розміри баластної призми встановлюються у залежності від категорії залізничної колії.

У кривих ділянках колії радіусом меншим за 600 м баластну призму збільшують із зовнішнього боку колії на 0,1 м. При цьому у кривій ділянці колії баластну призму виконують із урахуванням підвищення зовнішньої рейки.

Баластна призма повинна утримуватися відповідно до типових поперечних профілів баластної призми, що наведені на рис. 1.3 [10].

Слід зазначити, що крутість укосів баластної призми повинна прийматися 1:1,5, а крутість укосів піщаної подушки повинна становити 1:2.

Під час проведення модернізації, капітальних чи середніх ремонтів залізничної колії та під час виконання поточних ремонтів колії баластна призма повинна приводитися відповідно до типових профілів, що наведені на рис. 1.3.

1.5. Робота баласту при впливі вібраційних навантажень

Науково-дослідними випробуваннями баласту [11, 12, 13] у лабораторних умовах встановлено, що при вібраційному динамічному навантаженні, відбувається перемішування зерен щебеню, що призводить до інтенсивніших вертикальних осідань баласту. Вібраційна дія на баластний шар в умовах експлуатації виникає при повзунах на колесах, значних зазорах у стиках, вертикальних нерівностях на колії.

Вібраційним впливом займалися такі дослідники, як Baeßler і Rücker та Kienzer, у яких розглядалося ударноподібне навантаження, а також Cholet та ін., який займався періодичним навантаженням на баластний шар.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		14

У роботах [11, 12, 13] встановлено, що додаткові осідання баласту виникають у залежності від рівня прискорень або частоти збудження. Запропоновано граничне значення рівня прискорень 0,8 g для мостів із їздою на щебеневому баласту.

Слід зазначити, що вплив вібраційного навантаження виникає від дії різних механізмів, які призводять до збільшених осідань баласту. У роботах [11, 12, 13] проведені дослідження двох типів дії вертикального динамічного навантаження на баластний шар: ударне вібраційне навантаження на шпалу при люфті під шпалою та шпал, які мали добре обпирання на баластний шар.

Доведено, що при дії циклічного навантаження на баласт, його осідання не зростають відразу після удару, а потребують ще кількох циклів циклічного навантаження. Далі після розуцільнення баласту осідання збільшуються.

На рис. 1.4 показано значне зростання осідання баласту при послідовних 4000 циклах навантажень [11].

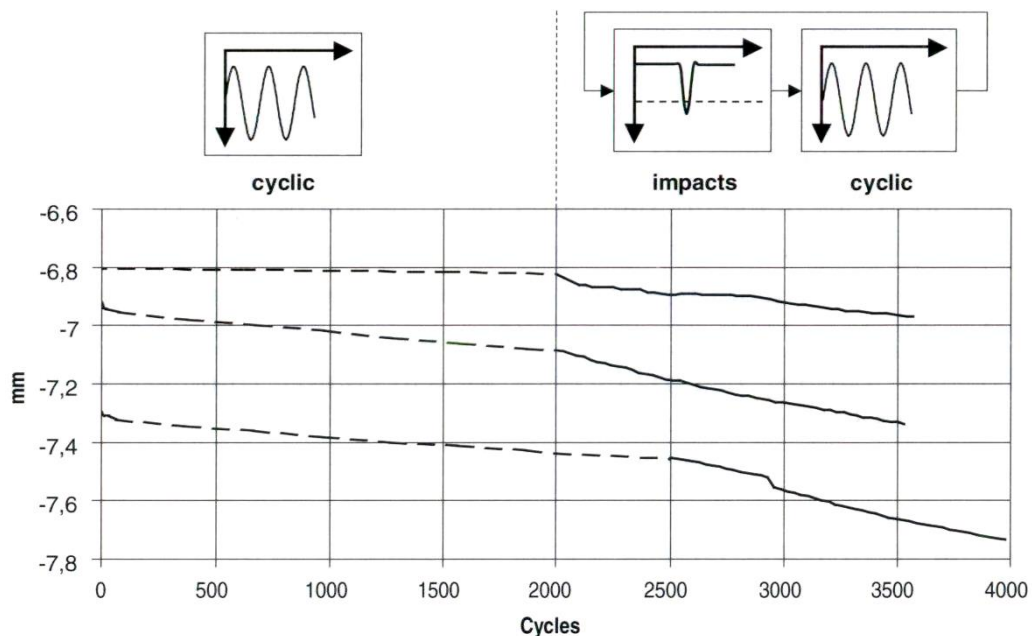


Рисунок 1.4 – Результати дослідження осідання баласту при дії циклічних вібраційних навантажень [11]

Дослідження осідання баласту різними комбінаціями циклічного та динамічного вібраційного навантаження: із різними амплітудами, частотами та тривалостями навантажень показали, що у випадку окремих імпульсних навантажень рядів S1-S3 прискорення збільшується до 4 g (S1–1 g, S2 – 1,9 g, S3

– 4 g.). При цьому інтенсивність наростання для ряду S3 є в декілька разів вищою, аніж для рядів S1-S2, при яких інтенсивність осідання баласту є приблизно однаковою (рис. 1.5).

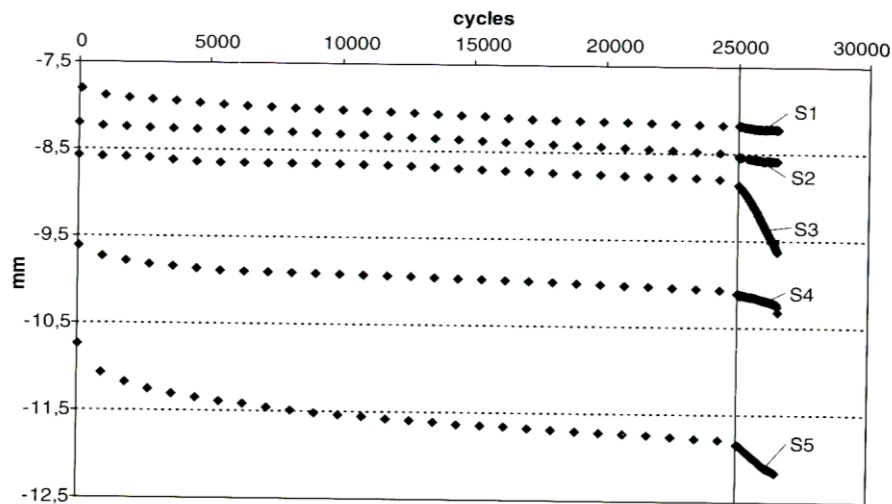


Рисунок 1.5 – Результати дослідження осідань баласту при відсутності люфту під шпалою при заданні 25000 циклів циклічного навантаження [11]

У результаті проведених досліджень встановлено, що вплив параметру частоти навантаження не є вирішальним при дії циклічного динамічного навантаження на баласт. Оскільки при підвищенні частоти прискорення у баластному шарі колії та в інших елементах перерозподіляються. У результаті це призводить до зменшення прискорень у баластному шарі.

На думку авторів, у праці [11] вагомий вплив на осідання баласту відіграє рівень навантаження від рухомого складу, прискорення та тривалість дії циклічного вібраційного навантаження.

У працях [11, 14, 15] проведено теоретичне моделювання, на основі методу молекулярної динаміки, впливу дії вібраційних навантажень на рівень вертикального прискорення та осідання шпали. У результаті встановлено, що при кожному рівні збільшення вібраційного прискорення відбувається збільшення інтенсивності залишкових осідань шпали. Встановлено, що початкова статична сила привантаження впливає тільки на рівень початкового осідання шпали. При цьому на інтенсивність розладнання щебеневого баласту вона не впливає.

Результати дії вібраційного прискорення та статичного привантаження на осідання шпали наведено на рис. 1.6.

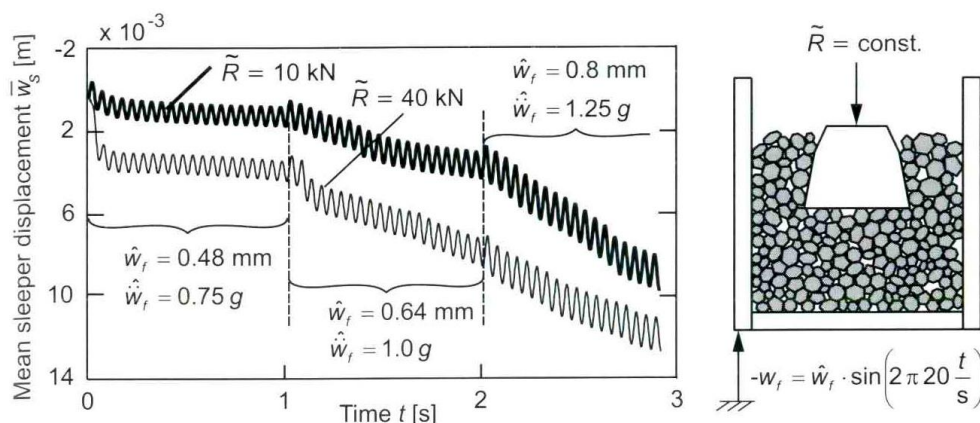


Рисунок 1.6 – Осідання шпали при заданні статичного привантаження та дії вібраційного прискорення [11]

У роботі [16] проведені дослідження роботи баластного шару при дії вібрації. Було проведено вимірювання значень сили та прискорень у щебеневому баласті при проходженні по колії рухомого складу залізниць. Вимірювання проводились при різних швидкостях рухомого складу та різних ухилах нерівностей на колії. У результаті авторами встановлено залежність прискорень у баласті від ухилу нерівності у випадку експлуатації колії на дерев'яних та залізобетонних шпалах (рис. 1.7).

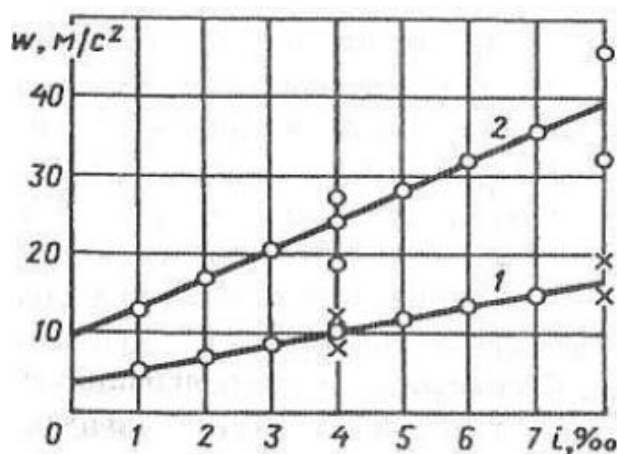


Рисунок 1.7 – Прискорення у щебеневому баласті при швидкості рухомого складу 70 км/год із врахуванням ухилу нерівності та конструкції колії: 1 - дерев'яні шпали, 2 - залізобетонні шпали [16]

Із результатів досліджень встановлено, що прискорення у баласті при колії на залізобетонних шпалах близько у 2,5 рази є вищими, аніж при колії на дерев'яних шпалах. Також встановлено, що прискорення при залізобетонних шпалах мають характерні виражені результати.

Встановлено, що у випадку збільшення швидкості рухомого складу від 0 до 70 км/год величина сил на шпалу зростає на 50 % при ухилі нерівності $i=8\%$. При цьому прискорення зросло в 1,6 рази. Результати досліджень прискорень у баласті наведено на рис. 1.8.

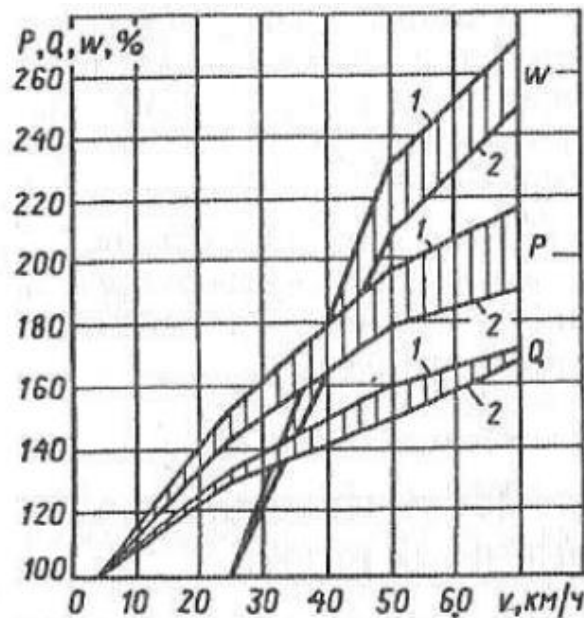


Рисунок 1.8 – Графіки зміни прискорень, тиску колеса на рейку і рейки на шпалі у залежності від швидкості рухомого складу і ухилу нерівності $i=8\%$ при: 1 – залізобетонних шпалах, 2 - дерев'яних шпалах [16]

У роботі [16] наведено залежності інтенсивності розладнань колії у залежності від тиску на баласт та вертикальних прискорень:

$$y_{\text{ж}} = 0,12P_{\text{ж}} + 0,060P_{\text{ж}} \left(\frac{w_{\text{ж}} - w_{\text{ож}}}{w_{\text{ож}}} \right)^{1,6}, \quad (1.1)$$

$$y_{\text{д}} = 0,12P_{\text{д}} + 0,048P_{\text{д}} \left(\frac{w_{\text{д}} - w_{\text{од}}}{w_{\text{од}}} \right)^{1,2}, \quad (1.2)$$

де y – інтенсивність накопичення залишкових осідань колії із залізобетонними і дерев'яними шпалами, мм/млн. т; P – тиск шпал на баласт, кгс/см² та w – вертикальні прискорення у баласті, м/с².

У випадку недостатньої висоти баластної призми, нерівномірного розподілу навантаження від рухомого складу залізниць на колію відбувається зниження несучої здатності забрудненого баласту (рис. 1.9). Таке явище проявляється виникненням виплесків на колії, особливо при перезволоженні земляного полотна залізниці.

На рис. 1.9 наведено схематичне уявлення про зниження несучої здатності забрудненого щебеневого баласту при перезволоженому земляному полотні [17]

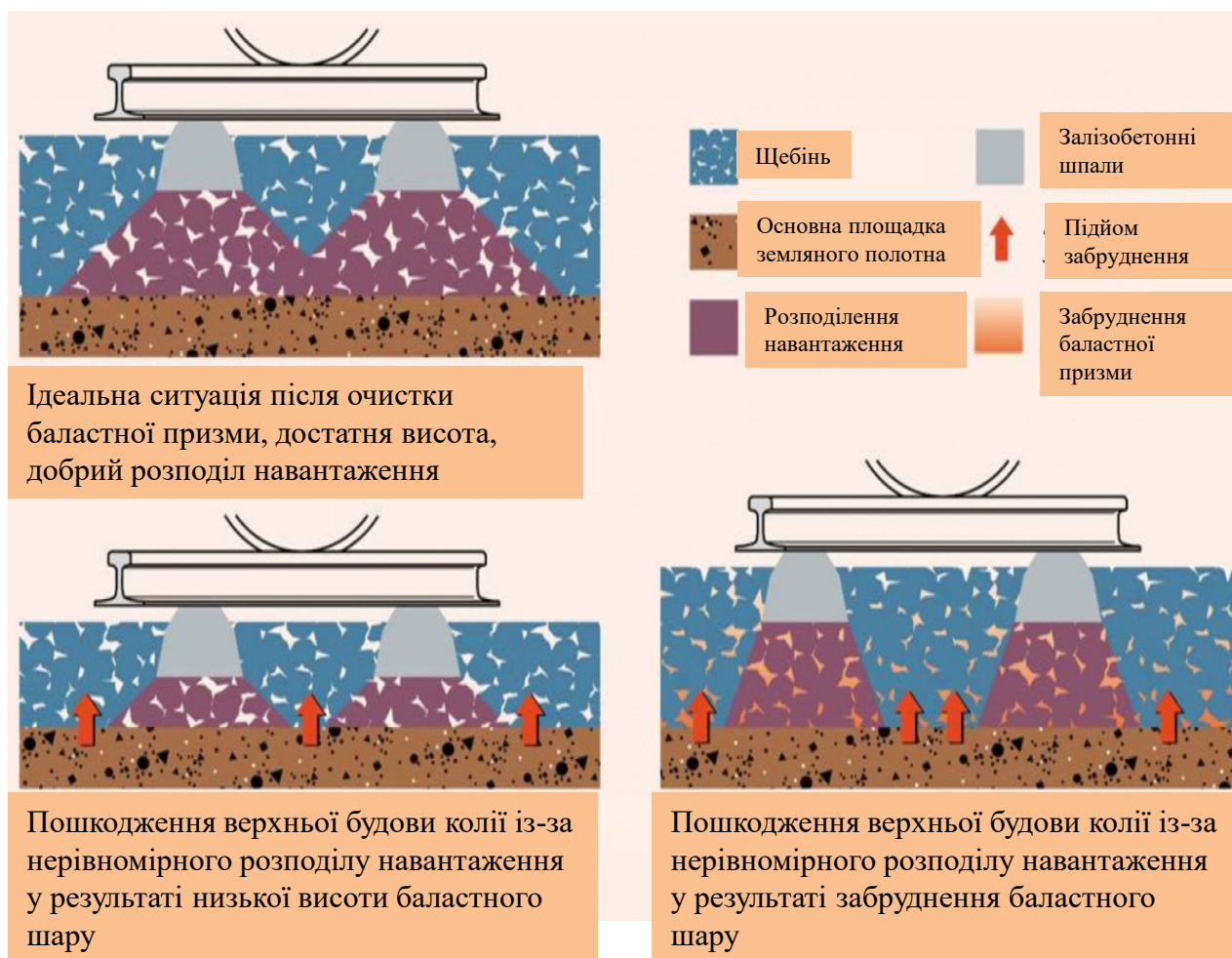


Рисунок 1.9 – Зниження несучої здатності забрудненого щебеневого баласту при перезволоженому земляному полотні [17]

У результаті проведених досліджень роботи баласту при дії циклічних вібраційних навантажень встановлено, що баластний шар у процесі експлуатації втрачає свої експлуатаційні характеристики, що приводить до осідання колії, утворення нерівностей тощо. Це вимагає проведення ремонтних робіт із відновлення експлуатаційних параметрів колії. Для виправлення колії у плані та

профілі використовуються виправочно-підбивочні-рихтовочні машини ВПО-3000 тощо.

Ефективність виправочно-підбивочно-рихтовочних робіт виконаних машиною ВПО-3000 буде визначатися забезпеченням нормативного ступеню ущільнення баласту у процесі виконання ремонтів колії.

1.6. Адаптація методів оцінки стану баласту українських залізниць до країн Європейського Союзу

Інтероперабельність (сумісність) – визначається як здатність здійснювати рух на будь-якій ділянці мережі залізниць. Отже, це можливість забезпечення безпечної експлуатації всіх різних технічних систем залізниць, які існують на Європейському континенті [18–21].

Залізнична система країн Європейського Союзу та України регулюється певними правовими засадами, які відповідно наведено на рис. 1.10 та рис. 1.11.

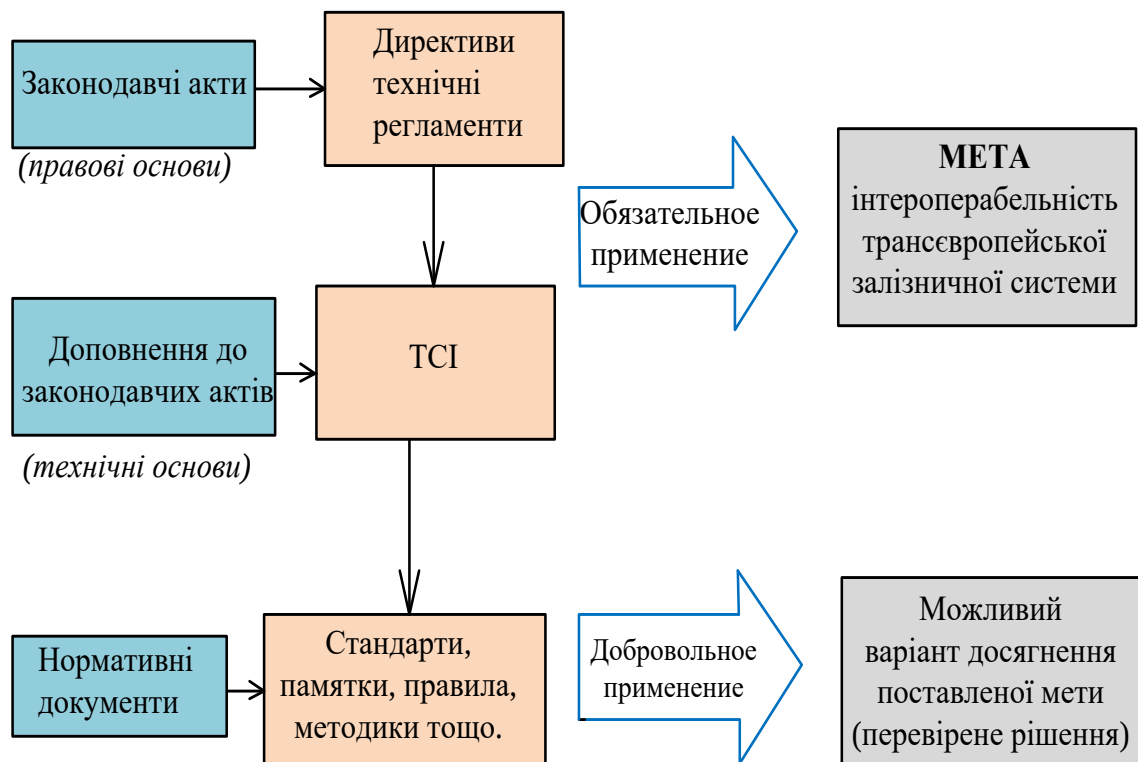


Рисунок 1.10 – Правове технічне регулювання на залізницях Європейського Союзу

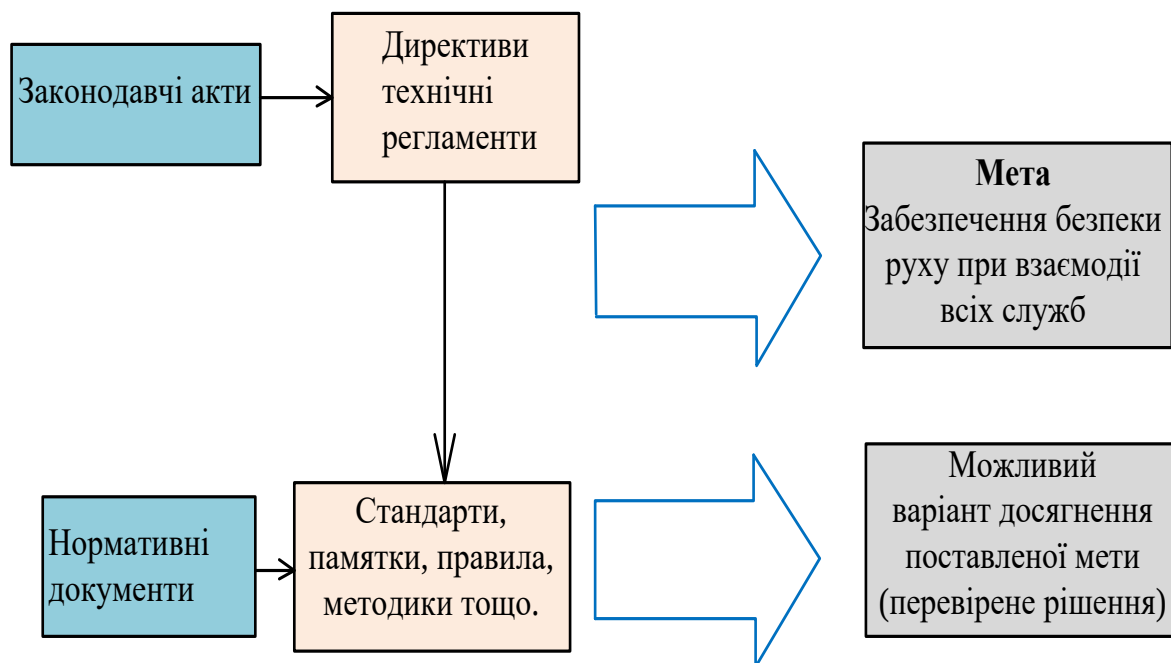


Рисунок 1.11 –Правове технічне регулювання на залізницях України

На сьогоднішній день Україна веде активну роботу у налагодженні законодавства у відповідності до країн членів Європейського Союзу. Велика робота проводиться для приєднання залізничного транспорту до відповідних конвенцій та угод ЄС.

Для України важливим завдання є забезпечення інтероперабельності інфраструктури, у тому числі й баластового шару та оновлення рухомого складу залізниць. Тому реформування системи залізничного транспорту є першим кроком адаптації законодавства залізничного транспорту України до стандартів ЄС. Для цього потрібно забезпечити системний та комплексний підхід.

Слід сказати, що однією з основних вимог ЄС, що наголошує Директива 2016/797 [19] є забезпечення безпеки руху рухомого складу залізниць. Одним із завдань є приведення земляне полотно та баластного шару колії до норм утримання, які повинні забезпечити надійність, міцність та стійкість. Це можна досягти за рахунок здійснення контролю технічного стану колії та вчасного усунення несправностей. Дуже важливо є утримання баласту колії відповідно до норм утримання, що дозволить забезпечити довговічність колії.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу роботи баласного шару залізничної колії в умовах експлуатації встановлено наступне:

1. Основним матеріалом для баласного шару залізничної колії являється щебінь.
2. Ефективність робіт виконуваних виправочно-підбивочно-рихтовочними машинами ВПО-3000 визначається забезпеченням нормативного ступеню ущільнення баласту у процесі виконання ремонтів колії.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						22
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ МАШИНОЮ ВПО-3000

2.1. Аналіз методів ущільнення баластної призми

Досягнення нормативного ступеню ущільнення баластної призми призводить до стабільної роботи колії, сприяє сприйняттю експлуатаційних навантажень від рухомого складу залізниць. У результаті чого баласт під поїздами, що рухаються, пружно деформується і поступово мінімально накопичує, протягом тривалого періоду експлуатації, залишкові деформації.

Крім цього досягнення баластом нормативного ступеню ущільнення характеризує якісні показники роботи машини.

Більш детально проаналізуємо показники якості ущільнення баласту, що використовуються в практиці експлуатації та проектування машин таких як ВПО-3000. Після ущільнення баласту машиною, під впливом поїзного навантаження, виникають пружні та непружні деформації рейкових ниток. Що викликаються пружними та непружними деформаціями баластного шару під поїздами.

У результаті нерівномірного накопичення осідань баластної призми відбувається зміна положення рейкових ниток у поздовжньому профілі, плані та за рівнем. При цьому швидкість накопичення осідань залежить у прямому сенсі від ступеня ущільнення баласту, його просторового розподілу ступеня ущільнення вздовж, впоперек і в глибину колії.

Для прикладу приймемо, що у початковий момент часу баластний шар має товщину H_H . Розрахункова схема наведена на рис. 2.1.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						23
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

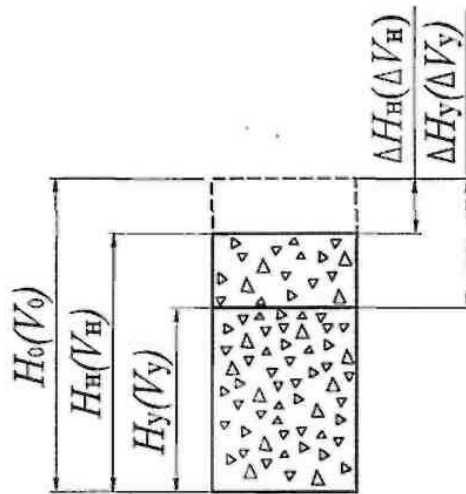


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема до визначення відносного осідання баласту в експлуатації у залежності від ущільнення

Після дії рухомого складу залізниць баластний шар осідає у вертикальній площині і його початкова розрахункова висота зменшується на величину H_y . Тобто відбувається ущільнення, яке можна позначити величинами осідань ΔH_n , ΔH_y із врахуванням граничної розпушеної величини баласту H_0 . У результаті відносний ступінь ущільнення баласту визначатиметься за формулою:

$$E_n = \frac{\Delta H_n}{H_0} = \frac{\Delta V_n}{V_0}; \quad E_y = \frac{\Delta H_y}{H_0} = \frac{\Delta V_y}{V_0}, \quad (2.1)$$

де V_0 – об'єм баластного шару в розпушеному стані, який приймається базовим. При роботі машини ВПО-3000 відбувається ущільнення баласту у результаті чого товщина відносного осідання баласту від роботи машини буде визначатися за формулою:

$$\Delta E_m = \frac{\Delta H_y - \Delta H_n}{H_0} = \frac{\Delta V_y - \Delta V_n}{V_0} = E_y - E_n, \quad (2.2)$$

Отже, відносне осідання баласту можна визначати через співвідношення об'ємів баластного шару у різних його станах (до ущільнення та після ущільнення). Тобто можна сказати, що осідання є зовнішнім проявом ефекту ущільнення баласту, але при умові, стабільної роботи земляного полотна залізниці.

Якщо проаналізувати процес ущільнення баласту на рівні взаємодії

частинок щебню одна із одною, то можна використати показник, який характеризує співвідношення об'ємів зайнятих частинками V_C (об'єм скелету) та об'ємів зайнятих повітрям V_{Π} (об'єм пор). Тоді пористість і коефіцієнт пористості відповідно визначатимемо за формулами:

$$n = \frac{V_{\Pi}}{V_C + V_{\Pi}}; \varepsilon = \frac{V_{\Pi}}{V_C}. \quad (2.3)$$

Слід зазначити, що наявна методика розрахунку ефективності роботи ущільнювальних робочих органів колійних машин, використовує, у якості основних показників, це коефіцієнт пористості і ступінь ущільнення баласту. За якими визначається відносне осідання шару щебеню. Формула для визначення ступеню ущільнення за відносним осіданням баластного шару має вигляд:

$$E = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{1 + \varepsilon_0}, \quad (2.4)$$

де ε_0 , ε – відповідно коефіцієнти пористості баластного матеріалу в пухкому та поточному ущільненому станах.

Якщо об'єм твердих частинок у процесі ущільнення баласту до та після ущільнення, не змінюється, то після виконання відповідних перетворень отримаємо формулу для розрахунку ступеню ущільнення баласту при його осіданні:

$$E_y = 1 - \frac{V_y}{V_H} (1 - E_H), \quad (2.5)$$

де V_H , V_y – початковий об'єм баласту та об'єм баласту після ущільнення; E_H , E_y – відповідно відносні ущільнення баласту у початковому стані та після ущільнення.

Ця формула використовується для розрахунку циклів робочих органів машин, що беруть участь у процесі ущільнення баласту залізничної колії.

2.2. Технологія роботи машини ВПО-3000 при ущільненні баласту залізничної колії

Однією із основних задач ремонту залізничної колії є очищення баластної призми колії від забруднення та поновлення в окремих випадках баластної призми новими матеріалами для баластування. На рис. 2.2 наведено формування та ущільнення баласту під час роботи машини ВПО-3000.

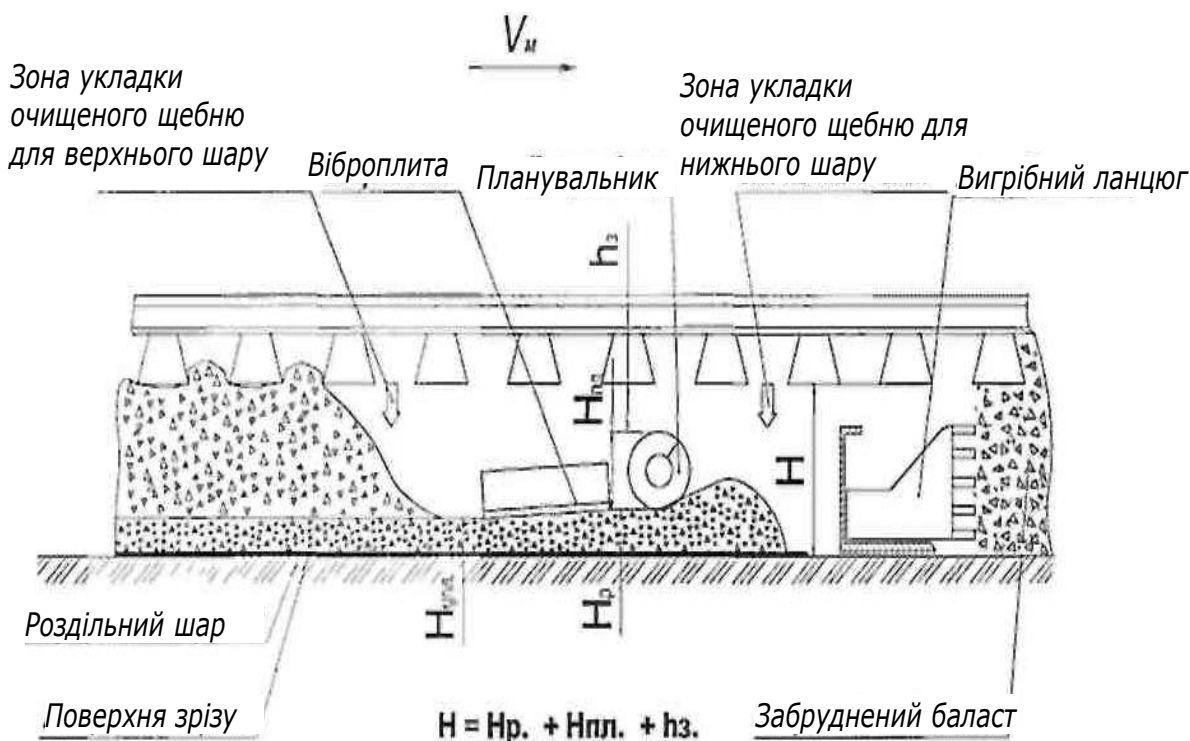


Рисунок 2.2 – Процес ущільнення баласту машиною ВПО-3000

Силовий вплив робочих органів колійної машини ВПО-3000 на баластний шар залізничної колії призводить до ущільнення баласту. Для виконання доброго ущільнення баласту потрібно всебічно розглядати вплив робочих органів на процес ущільнення.

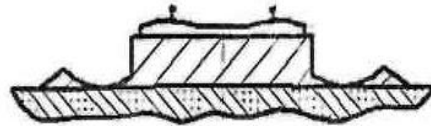
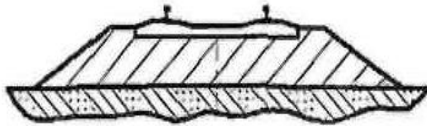
У праці [22, 23] встановлено, що глибина очищення баласту H дорівнює сумі товщини нижнього шару очищеного щебеню в пухкому (до ущільнення) стані $H_p=20$ см, висоти планувальника $H_{пл}$ та зазору між подошвою шпал та його верхньою площиною $h_з$. У результаті отримаємо формулу для розрахунку глибини очищення щебеневого баласту:

$$H = H_p + H_n + h_3.$$

Технологічний процес очищення баластного шару залізничної колії машиною горизонтально-напрямленої дії ВПО-3000 наведено на рис. 2.3.

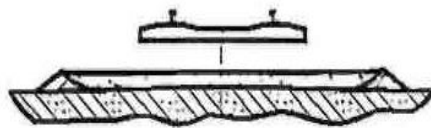
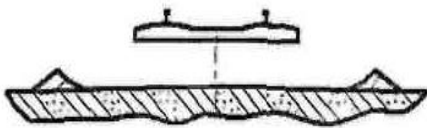
А) Забруднена баластна призма

Б) Вирізка баласту у торці шпали



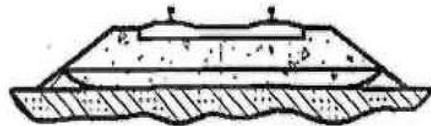
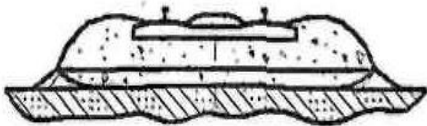
В) Вирізка баласту під шпалами

Г) Ущільнення нижнього шару баласту



Д) Дозування баласту

Е) Планування баласту



Умовні позначення



Забруднений баласт

Чистий баласт

Земляне полотно

Рисунок 2.3 – Технологічний процес очищення баластного шару залізничної колії машиною ВПО-3000

Технологічний процес включає виконання декількох етапів очищення забрудненого баласту колії. На першому етапі виконується вирізка забрудненого баласту. Вона становить до 35 % об'єму від загального об'єму баласту, що очищається. На другому етапі щебнеочисні машини робочими органами виконують вигрібання вирізаного баласту під шпалами (рис. 2.3, в). За

необхідності можна вкладати шар геотекстилю. На наступному етапі відбувається ущільнення нижнього шару баласту (рис. 2.3, г). Об'єм, який потрібно заповнити новим баластом заповнюється новими баластними матеріалами за допомогою хопер-дозаторних вертушок (рис. 2.6, д). Після цього проводиться планування баластної призми (рис. 2.3, е).

Планування передбачає виконання механізованих виправочно-підбиваючих та планувальних робіт із постановкою колії у проектне положення. Положення в поздовжньому та поперечному профілі та за рівнем з одночасним ущільненням баласту під шпалами та стабілізацією баластового шару.

На рис. 2.4 показано робочі операції формування ущільненого баластного шару залізничної колії.

Ущільнення у підшпальній зоні баласту машиною ВПО

А)



Б)



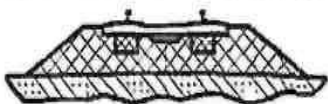
В) Дозування баласту хопер-дозаторами



Г) Ущільнення відкосів машиною ВПО



Д) Ущільнення баласту машиною ВПР під шпалами у зоні рейок



Е) Стабілізація і планування баласту



Умовні позначення



Неущільнений баласт



Ущільнений баласт



Баласт із підвищеним показником ущільнення

Рисунок 2.4 – Процес формування ущільненого баластового шару залізничної колії машиною ВПО-3000

По технологічному процесу виконується ущільнення баластного шару в підшпальній зоні, з боку торців шпал за допомогою основних віброплит (рис. 2.4, а, б). Ці операції виконують машини безперервної дії ВПО-3000.

Слід зазначити, що для ефективної роботи машин ВПО-3000 проводиться вирізка забрудненого щебеню із торців шпал на ширину не менше 3,9 м. Це запобігає попаданню забрудненого щебеню із торців шпал у свіжоукладений щебенекий баласт. Після поповнення баластної призми новим щебенем (рис. 2.4, в) машина ВПО-3000 забезпечує ущільнення баластного плеча та укусу баластової призми до нормативних вимог (рис. 2.4, г).

Опоряджувальними роботами по ущільненню баластного шару є динамічна стабілізація та планування баластної призми (рис. 2.4, д, е). Динамічний стабілізатор колії призводить до осідання рейкошпальної решітки та додатковому ущільненню баласту у підшпальній зоні. І після цього планувальник баласту формує проектні розміри баластної призми.

Слід зазначити, що критеріями оцінки якості роботи стабілізованої баластної призми залізничної колії є показники ступеня ущільнення. Він буде показувати у процесі експлуатації баластної призми інтенсивність та швидкість накопичення осідань призми уздовж залізничної колії. Це у свою чергу буде впливати на міжремонтні терміни та визначати обсяги виправно-підбивочних робіт при поточному утриманні колії.

У процесі ущільнення баласту із використанням машин ВПР-02, ВПО-3000 не забезпечується ущільнення середніх шарів під шпалою. Тобто зони впливу робочих органів не передбачають ущільнення баласту під серединою шпали (рис. 2.5).

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						29
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

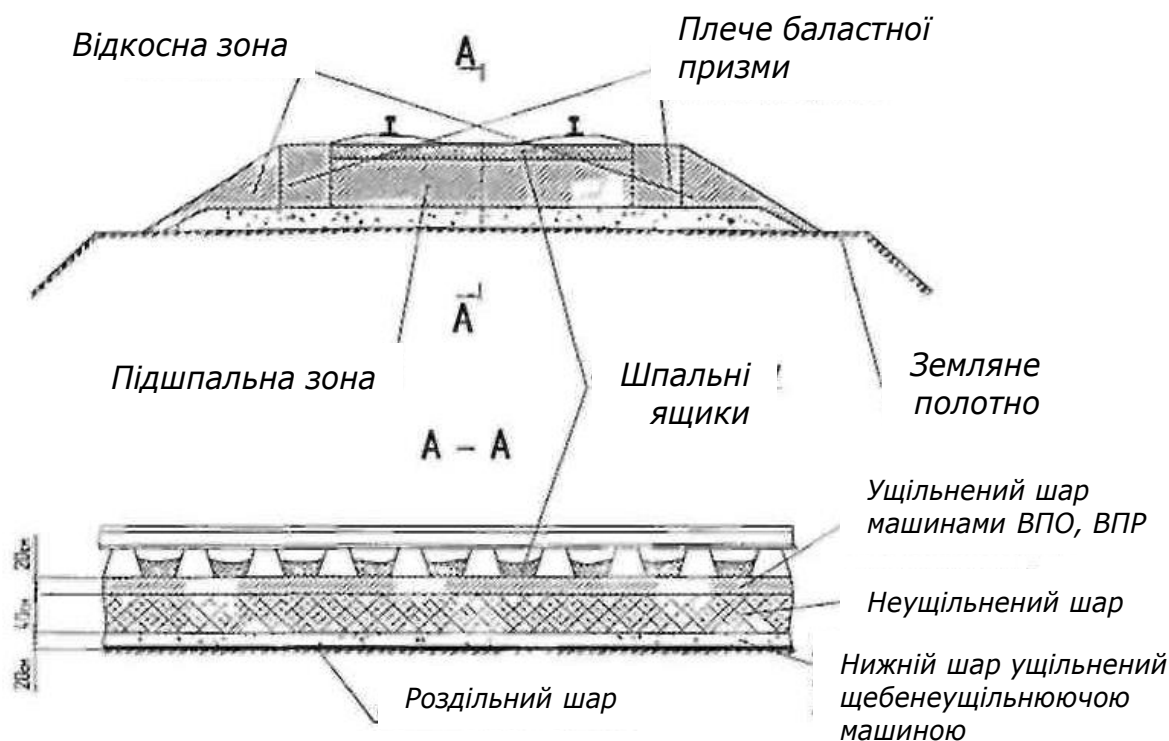


Рисунок 2.5 – Характерні зони ущільнення баластної призми колії

При всіх видах ремонту колії використовується виправно-підбивочно-опоряджувальна машина ВПО-3-3000С. Вона виконує формування, ущільнення та стабілізацію баластної призми після глибокого очищення щебеню (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Вид машини ВПО-3000

Основними перевагами машини ВПО-3-3000С перед машинами ВПО-3000 і ВПО-3-3000 є:

- наявність блоку динамічної стабілізації залізничної колії;
- можливість заглиблення віброплит на 50 см нижче підшви шпали, що

дозволяє проводити глибше очищення баласту;

- автоматизація виправки колії, що дозволяє отримати точність виправки до ± 2 мм.

Технологічний процес робіт по очищенню щебеню колії машиною ВПО-3-3000С складає із трьох проходів (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Технологічний процес очищення щебеню за допомогою машини ВПО-3-3000С

Перший проїзд машини виконує занурення віброплит у баластний шар на глибину 40–45 см нижче підшви шпал. Другий проїзд – занурення віброплит на глибину 15–20 см нижче від підшви шпал та третій проїзд передбачає стабілізацію колії [24].

2.3. Робочі органи виправно-підбиваючих машин горизонтальної дії

Ущільнення щебеневої баластної призми машинами – це важлива складова технологічних процесів ремонту та поточного утримання колії. Операції із ущільнення щебеневої баластної призми є заключними операціями, що визначають якість виконання всього комплексу робіт. Вони виконуються в суміщенні за часом і місцем виконання з іншими операціями на колії.

Основними робочими органами машин горизонтальної дії є віброплити безперервної дії (рис. 2.8). Ущільнення баласту відбувається у підшпальній зоні колії за рахунок горизонтального віброобтискання з боку шпал.

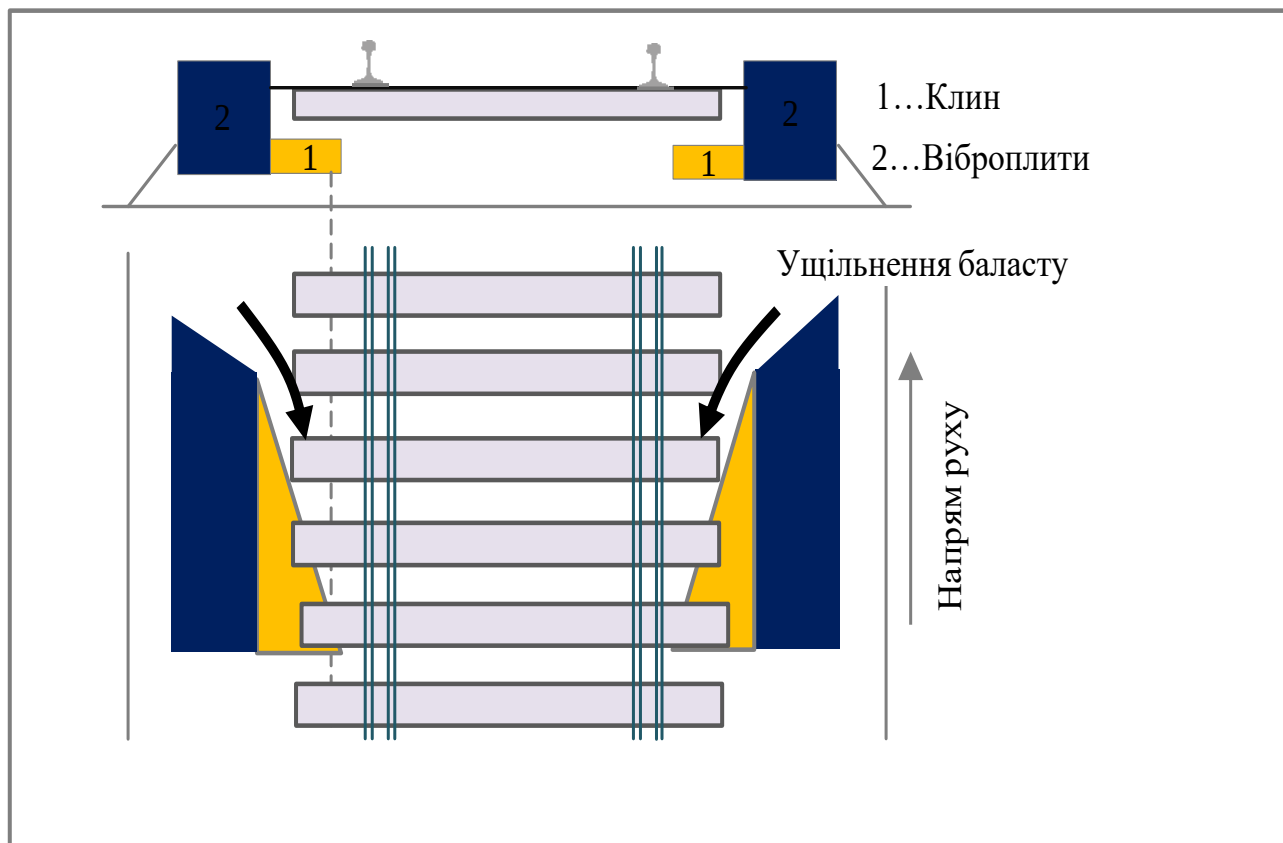


Рисунок 2.8 – Робочі органи машин ВПО-3000 горизонтально напрямленої дії при ущільненні баласту колії

Віброплита машини ВПО-3000 складається із віброплити зварної конструкції із титанового зносостійкого матеріалу. Віброплита має загострену у плані носову частину. Основний і додатковий ущільнювачі клини, через які здійснюється віброобтисканий вплив на підшпальну зону баластної призми.

Віброплита підвішена на зварній поздовжній балці через комплекти листових ресор, що виконують функції пружних зв'язків у коливальній системі.

На балці встановлено електродвигун, пов'язаний із входним валом вібробудника через карданний вал. Поздовжня балка встановлюється вушками через шарнірні вузли на підйомно-поворотних кронштейнах механізму підвіски віброплит. Розсікач, розташований у передній частині балки, дозволяє зменшити тягове навантаження на ресорні комплекти. Відбійний лист служить зменшенням втрат баластного матеріалу, що спрямовується у зону ущільнення.

За умов оптимального поєднання параметрів вібрування потрібна підвищена кутова частота вібрування порівняно зі стандартною для електроприводу

промислового виконання частотою (25 Гц). Для цього у віброплиті застосована додаткова передача, що дозволяє досягати частоту вібрації 35 Гц [25].

Висновки до розділу 2

1. Ущільнення щебеневої баластної призми машинами – це важлива складова технологічних процесів ремонту та поточного утримання колії. Операції із ущільнення щебеневої баластної призми є заключними операціями, що визначають якість виконання всього комплексу робіт. Вони виконуються в суміщенні за часом і місцем виконання з іншими операціями на колії.

2. Ефективність процесу ущільнення баластної призми визначається робочими характеристиками машини. Оптимальною частотою роботи віброплит машин ВПО-3000 є частота вібрації 35 Гц.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						33
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ БАЛАСТУ МАШИНОЮ ВПО-3000 У ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

3.1. Аналіз методів дослідження поширення хвиль SASW і MASW при ущільненні щебеневого баласту

Дія рухомого складу залізничного транспорту на баласт призводить до розповсюдження хвиль удару в баласті. Процес розповсюдження коливань в елементах колії залежить від фізико-механічних характеристик матеріалів баластної призми та конструкції колії. Дослідження параметрів поширення хвиль удару дозволить встановити фактичний технічний стан колії [26, 27].

Одним із недовговічним елементом колії є баластний шар. При розладнанні баластного шару відбувається розладнання всієї залізничної колії. Тому розробка експериментальних методів оцінки ступеню ущільнення баластного шару залізничної колії в умовах експлуатації є актуальною задачею магістерської роботи.

У магістерській роботі пропонується за допомогою пружних хвиль удару визначати технічний стан баластної призми. Оскільки, встановлення залежності між часом розповсюдження хвилі при різних ступенях ущільнення баластного шару та гранулометричного складу, дозволить прогнозувати подальше розладнання геометрії колії. Крім цього даний метод можна використовувати для перевірки якості ущільнення баласту після виконання виправочно-підбивочних робіт на залізничній колії машиною ВПО-3000 та її модифікаціями.

Для реєстрації параметрів хвиль зсуву застосовуються поверхневі хвилі Релея і Лява. Використання поверхневих хвиль Релея виявилось ефективним при хвильовому аналізі зони малих швидкостей у верхній частині геологічного розрізу. Засновані на їх застосуванні сучасні руйнівні методи вивчення інженерно-геологічного розрізу (SASW і MASW). Вони дозволяють визначити фазові швидкості спектральних компонент і побудувати вертикальний профіль поширення швидкостей поперечних хвиль удару.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		34

3.2. Метод дослідження розповсюдження хвиль удару SASW (Spectral Analysis Surface Waves)

У країнах Європейського Союзу для визначення швидкостей розповсюдження пружних хвиль удару використовується метод SASW (Spectral Analysis Surface Waves – спектральний аналіз поверхневих хвиль).

За даними профілю V_s будується крива розподілу швидкостей, а при інверсії – зворотне перетворення. На рис. 3.1 наведена схема прямої та зворотної задач методу SASW.

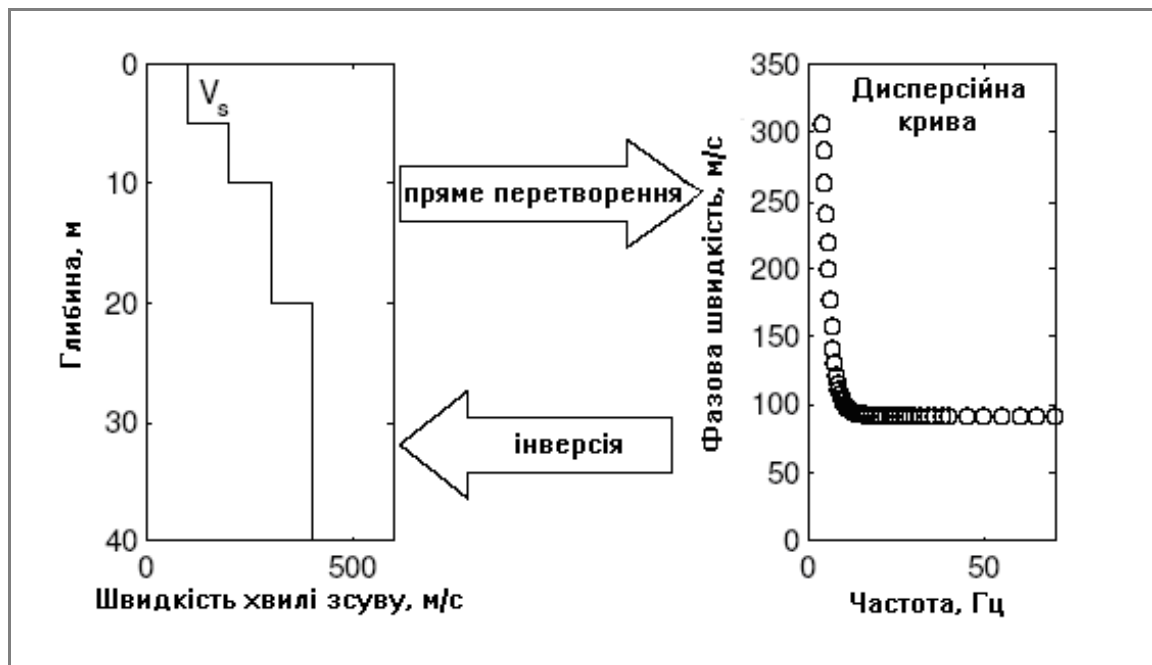


Рисунок 3.1 – Прямая та зворотня задача методу SASW

У працях [28–32] наведено залежності для оцінки швидкостей поширення пружних хвиль удару із врахуванням деформаційних характеристик ґрунтів, таких як модуль пружності і модуль зсуву [28, 32]. Які визначаються за формулами:

$$G = \rho c_s^2, \quad (3.1)$$

$$E = \rho c_s^2 \frac{3 \left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 4}{\left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 1}, \quad (3.2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.3)$$

де c_s – швидкість розповсюдження поперечних хвиль S -хвилі; c_p – швидкість розповсюдження поздовжньої хвилі P -хвилі; ν – коефіцієнт Пуансона; ρ – щільність середовища.

Процес визначення поширення хвиль за методом SASW включає три етапи проведення досліджень:

- проведення записів поширення хвиль удару у польових умовах. На рис. 3.2 наведена схема експериментальних досліджень.

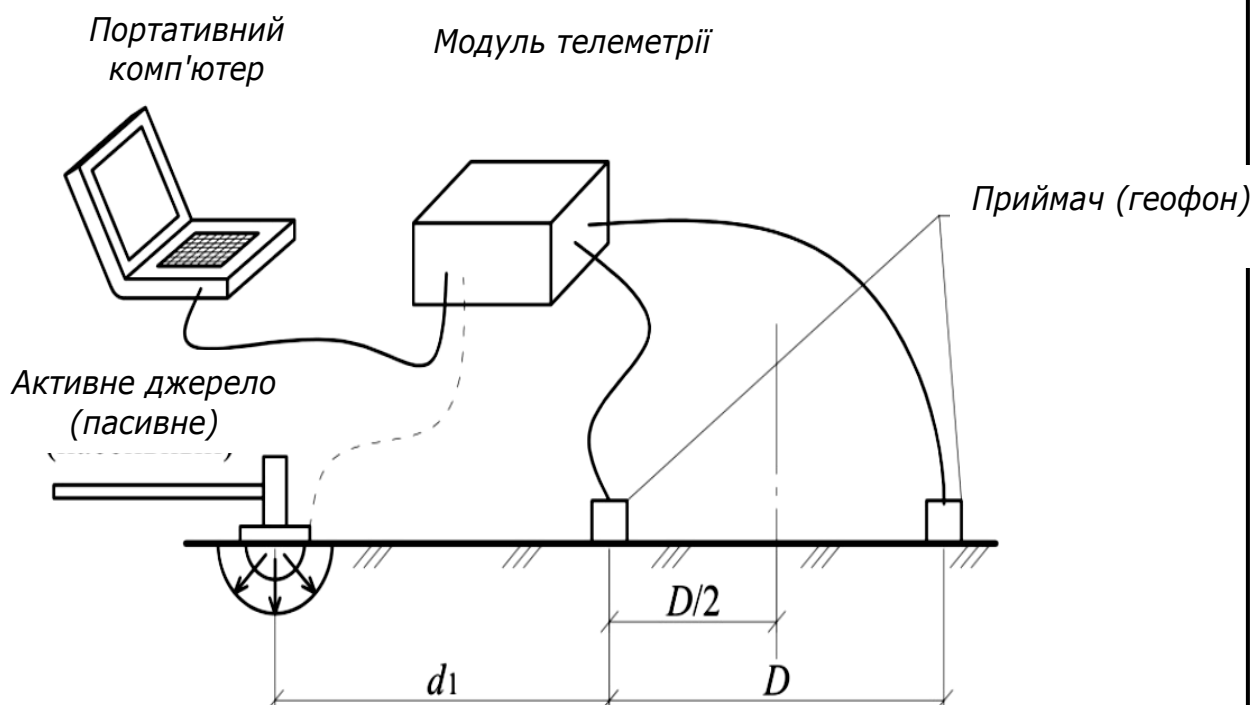


Рисунок 3.2 – Методика дослідження параметрів поверхневих хвиль методом SASW

-встановлення за отриманими даними поширення залежності фазової, або групової швидкості від частоти;

- визначення розподілу швидкостей поперечних хвиль у середовищі.

Метод спектрального аналізу хвильових полів дає достатню інформативність досліджуваних параметрів дорожньої конструкції.

3.3. Метод багатоканального аналізу поверхневих хвиль MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Метод багатоканального аналізу поверхневих хвиль дозволяє реєструвати поверхневі коливання хвиль Релея від різних джерел. Далі проводити аналіз швидкостей поширення хвиль, за якими будується профіль швидкостей поперечних хвиль.

Перехід від швидкостей поперечних хвиль до початкових деформаційних характеристик розраховується за залежностями (3.1)–(3.3).

Багатоканальний аналіз поверхневих хвиль, як і спектральний аналіз, проводиться в три етапи:

- збір польових даних поширення пружних хвиль удару;
- дисперсійний аналіз;
- інверсія.

Для виконання першого етапу досліджень поширення хвиль удару використовується 24-канальна система з низькочастотних геофонів (4,5 Гц), з'єднаних с телеметричним модулем. Отримані сейсмограми передаються на портативний комп'ютер. Схема системи представлена на рис. 3.3.

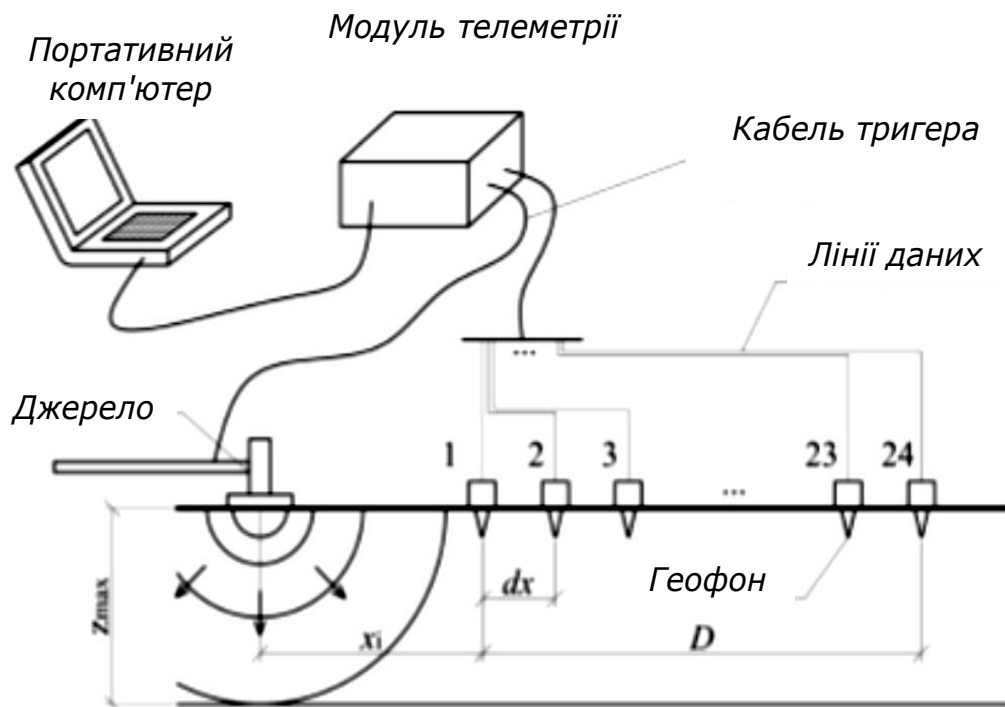


Рисунок 3.3 – Схема із дослідження поширення хвиль удару методу MASW

Проаналізовані методи SASW і MASW мають ряд переваг перед іншими методами. Слід зазначити, що вони є неруйнівними та дають велике зображення ВЧХ для всієї вимірюваної області, що дозволяє якісно виконати геологічний розріз. Однак економічні витрати на їх реалізацію є високими, тому у магістерській роботі запропоновано більш дешевий метод оцінки ступеню ущільнення баласту залізничної колії.

3.4. Методика лабораторного дослідження ступеню ущільнення баласту машиною ВПО-3000

Для проведення експериментальних досліджень ступеню ущільнення баласту за принцип дії машини ВПО-3000 було розроблено прототип машини горизонтально-напрямленої дії, що відображає принцип роботи машини ВПО-3000. Прототип машини наведено на рис. 3.4.

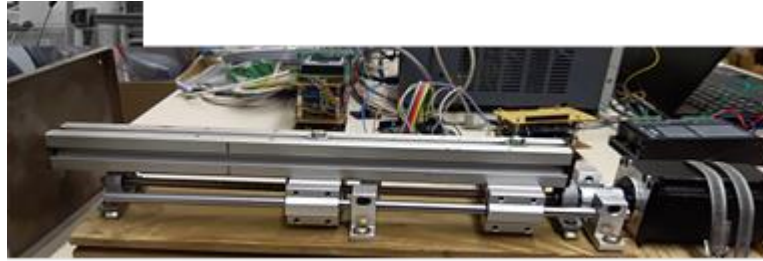


Рисунок 3.4 – Машина горизонтально-напрявленої дії, що моделює роботу машини ВПО-3000

Для повного відтворення роботи машини ВПО-3000 прототип машин має горизонтальну напрямлену раму. Рама за допомогою сервомотору переміщується у горизонтальному напрямі. За допомогою сервомотору виконується вібрація рами. У результаті переміщення рами відбувається переміщення щебеню у горизонтальному напрямі та його ущільнення під шпалою.

Масштабована модель баластного шару представлена зразком щебеню з вільним ухилом між скляними стінками (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Процес підбиття щебеню прототипом машини ВПО-3000

Зразок вертикально і горизонтально обмежений штампами. У даних дослідженнях горизонтальний штамп відповідає ущільненню баластного шару, а вертикальний – роботі машини при русі.

Для оцінки ступеню ущільнення баласту використано аналогові датчики прискорень ADXL 335 (рис. 3.6). За допомогою яких реєструються сигнали поширення пружних хвиль удару від джерела імпульсу до приймаючого датчику.

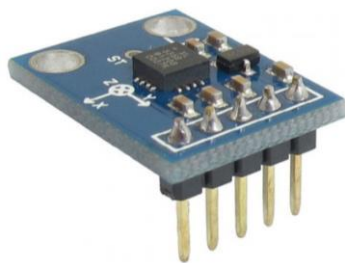


Рисунок 3.6 – Вид датчика прискорень ADXL 335

Датчики прискорень монтувалися в основі баластної призми. Після кожного ступеню ущільнення баласту задавався імпульс і визначався час проходження пружної хвилі удару від джерела імпульсу до приймаючого датчику прискорень.

Схема до визначення поширення хвиль і реєстрації пружної хвилі удару наведена на рис. 3.7.

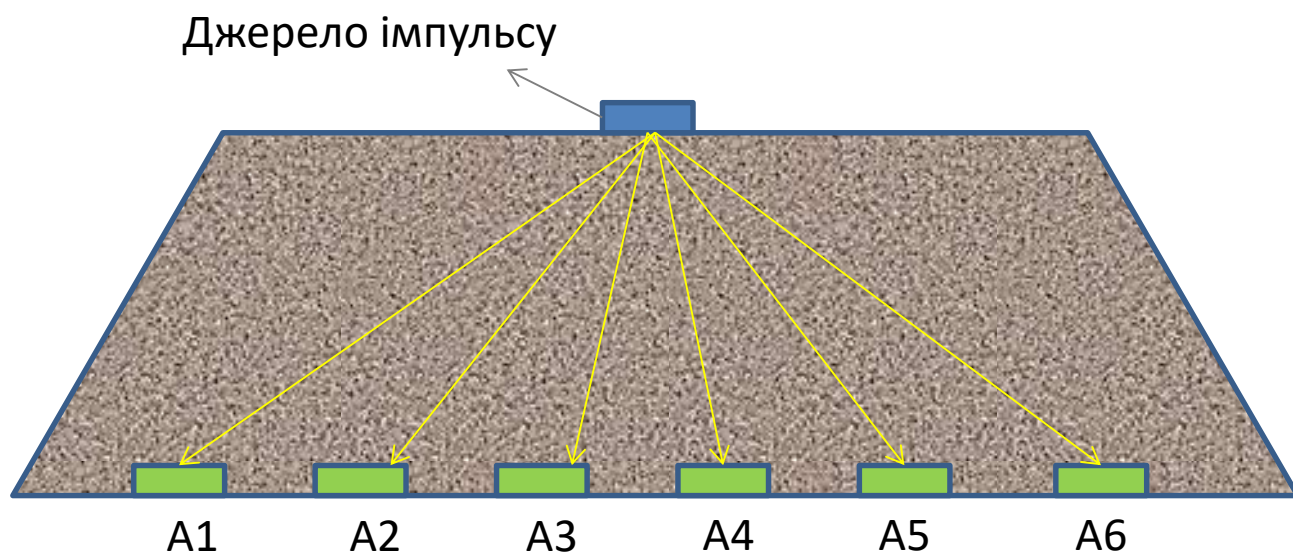


Рисунок 3.7 – Схема до визначення поширення пружних хвиль удару

За допомогою запрограмованого мікроконтролера відбувався запис поширення хвиль удару. Процес запису хвиль удару наведено на рис. 3.8.

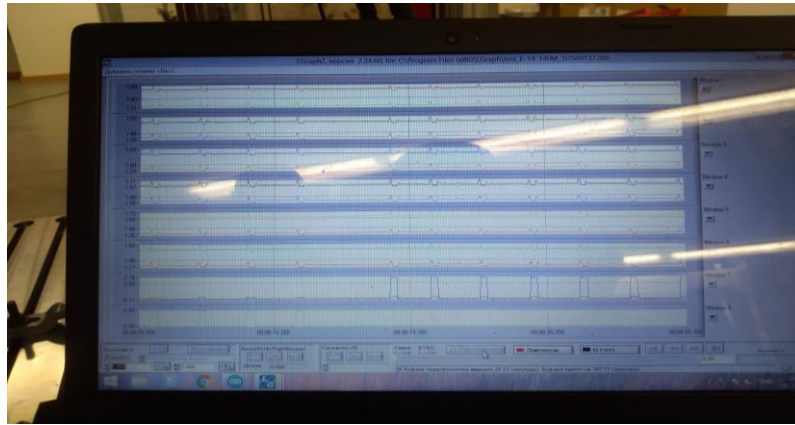


Рисунок 3.8 – Процес запису поширення пружних хвиль удару

У процесі руху прототипу машини відбувається ущільнення баласту і його переміщення вздовж шпали. У результаті на склі утворилися траєкторії руху частинок щебеню (рис. 3.9).

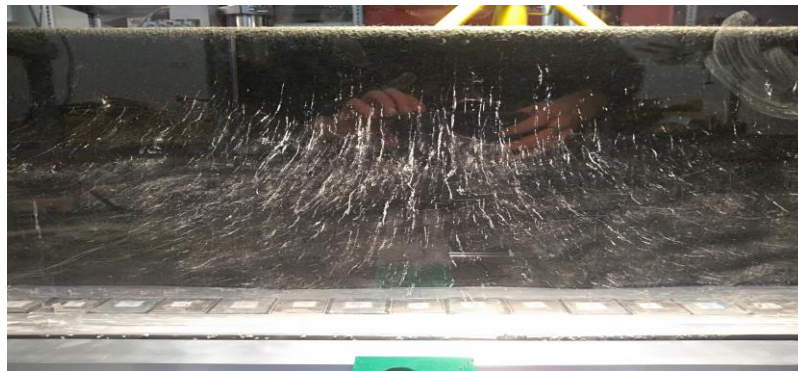


Рисунок 3.9 – Траєкторії руху щебинок баласту у процесі ущільнення баласту

Рух баласту характеризується розподілом швидкості частинок у вертикальній площині. Швидкість частинки визначається як приріст вертикального та горизонтального положення щебених частинок у процесі виконання ущільнення баласту. Співвідношення між вертикальним рухом частинок під шпальним штампом і трамбуєчим становить приблизно 0,26. Далі наведемо результати вимірювання прискорень та часу поширення пружних хвиль удару.

3.5. Результати експериментальних досліджень ступеню ущільнення баласту при роботі прототипу машини ВПО-3000

Експериментальні дослідження поширення прискорень у баластному шарі визначаємо залежно від розташування датчиків прискорень та програми експериментальних досліджень.

Результати поширення вертикальних прискорень, при розуцільненому щебеневому баласті, наведено на рис. 3.10.

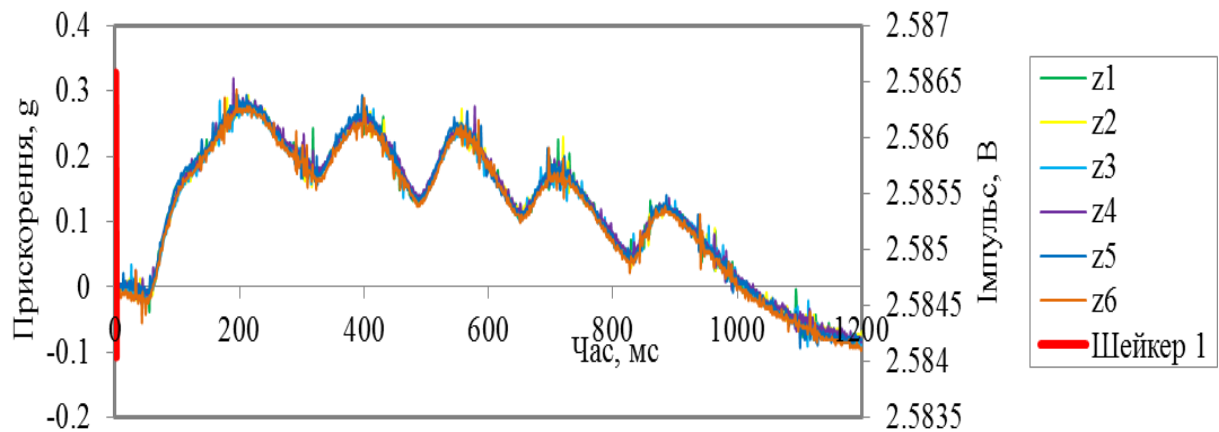


Рисунок 3.10 – Поширення вертикальних хвиль удару при розуцільненому щебеневому баласті

Із рис. 3.10 можна побачити, що максимальна амплітуда вертикальних прискорень при розуцільненому баласті становить 0,28 g.

На рис. 3.11 наведені виміряні вертикальні хвилі удару, одержані із акселерометрів, які розташовані на різних відстанях від імпульсного джерела збурення у випадку проміжного ущільнення баласту.

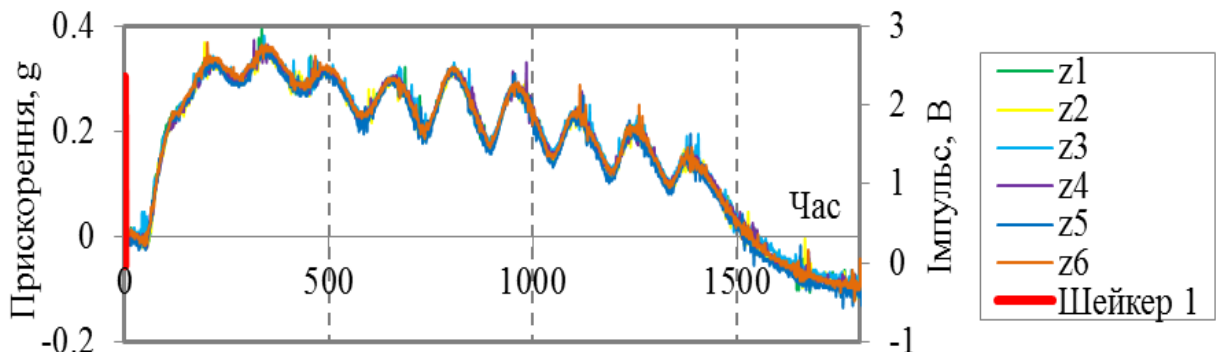


Рисунок 3.11 – Поширення вертикальних хвиль удару при проміжному ущільненню щебеневого баласту

Із рис. 3.11 можна побачити, що максимальна амплітуда вертикальних прискорень при проміжному ущільненню баласту становить 0,36 g.

На рис. 3.12 наведені виміряні вертикальні хвилі удару, одержані із акселерометрів, які розташовані на різних відстанях від імпульсного джерела збурення та при максимальному ущільненні щебеневого баласту.

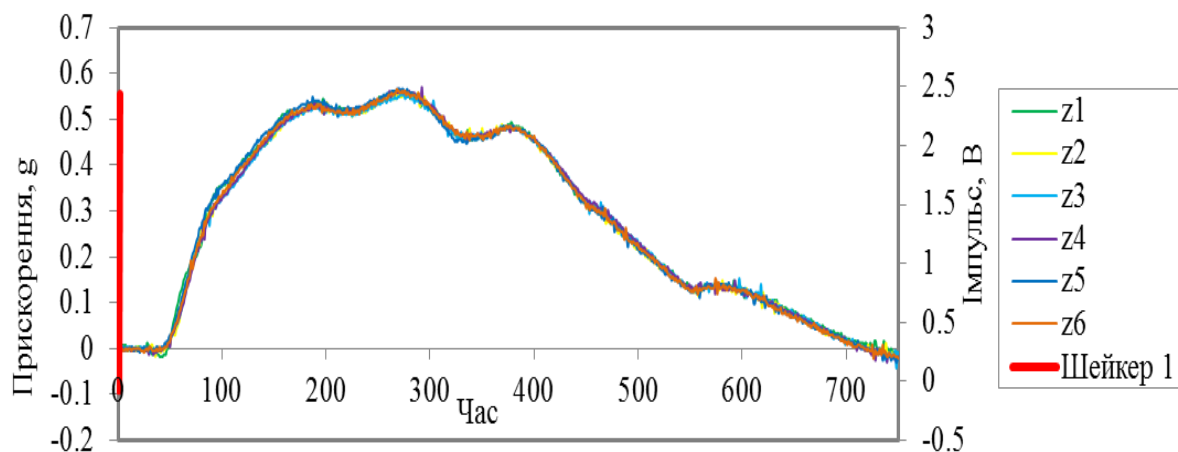


Рисунок 3.12 – Поширення вертикальних хвиль удару при максимальному ступені ущільнення баласту

Із рис. 3.12 можна побачити, що максимальна амплітуда вертикальних прискорень становить 0,56 g.

Із проведених досліджень можна побачити, що при збільшенні ступеню ущільнення баласту відбувається збільшення амплітуди прискорень. Крім цього характер поширення хвилі удару при розущільненому баласті має синусоподібну форму. У випадку максимального ущільнення баласту пружна хвиля поширюється плавно у вигляді одного бугра.

3.6. Результати дослідження швидкості поширення пружної хвилі удару

Для визначення швидкості поширення пружної хвилі удару від джерела імпульсу до датчику прискорень, приймаємо мінімальну відстань проходження хвилі. Схема до розрахунків швидкості наведена на рис. 3.13.

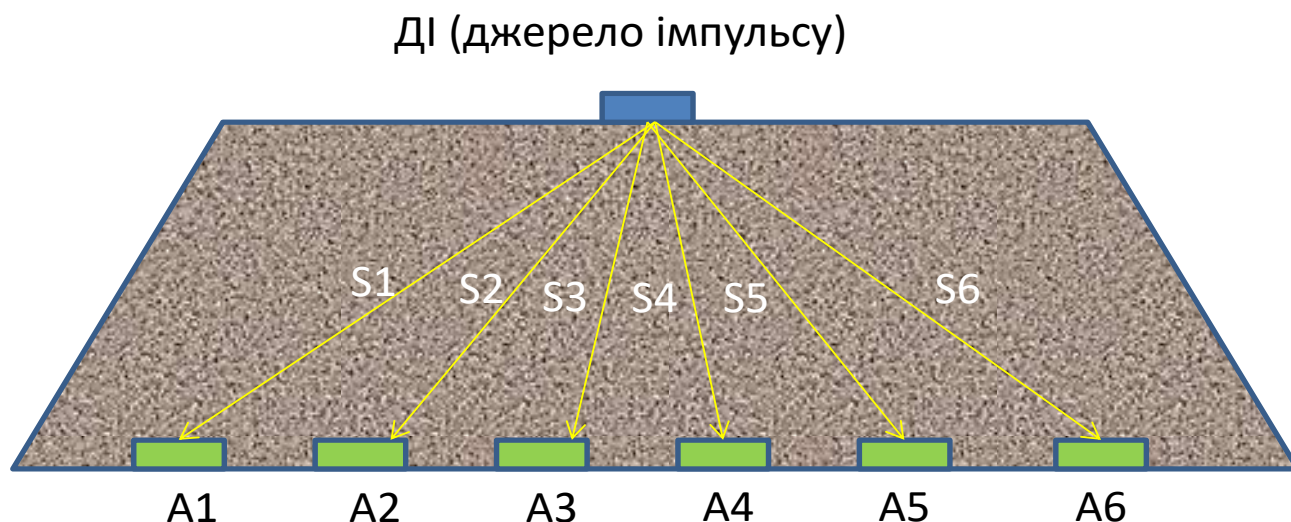


Рисунок 3.13 – Схема до розрахунків швидкості поширення пружних хвиль удару

Аналіз поширення хвиль удару виконується по прямих ДІ – А1; ДІ – А2; ДІ – А3; ДІ – А4; ДІ – А5; ДІ – А6. У кожному циклі випробувань враховується висота щебеневого баласту після виконання підбивки баластної призми.

Результати швидкості поширення пружних хвиль удару наведено на рис. 3.14.

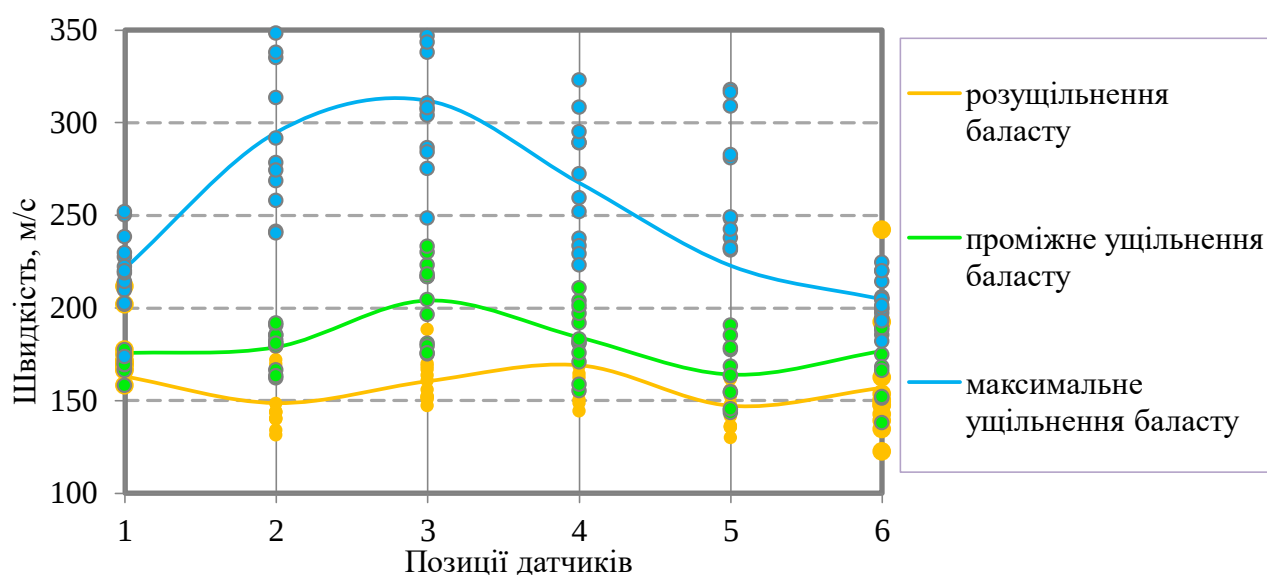


Рисунок 3.14 – Результати дослідження швидкостей поширення пружних хвиль удару у щебеневому баласті після підбивки прототипом машини ВПО-3000

Із проведених досліджень швидкостей поширення пружних хвиль удару у щебеневому баласті бачимо, що при неущільненому баласті максимальна швидкість поширення хвилі удару становить 171 м/с, при проміжному ущільненні – 207 м/с та при максимально ущільненому баласті швидкість поширення пружної хвилі удару становить 318 м/с.

Отже, за допомогою запропонованого методу у магістерській роботі можна визначати швидкість поширення пружних хвиль удару у залежності від ступеню ущільнення баласту колії. Цей метод є ефективним при застосуванні його для оцінки ступеню ущільнення баласту після підбивки машиною ВПО-3000.

Висновки до розділу 3

У результаті проведених експериментальних досліджень ущільнення баласту прототипом машини ВПО-3000 у лабораторних умовах отримано такі висновки:

1. Встановлено, що при недостатньому ущільненню баласту сигнал значно втрачає потужність, що видно із часу проходження хвилі до крайніх датчиків, які знаходяться найближче до вільного кінця баластного плеча.

2. По швидкості та формі поширення хвилі можна судити про ступінь ущільнення баластного шару залізничної колії.

3. При збільшенні ступеню ущільнення баластної призми збільшується швидкість поширення пружної хвилі у баласті.

4. Встановлено, що швидкість поширення пружних хвиль удару при неущільненому баласті становить 171 м/с, при проміжному ущільненні – 207 м/с та при максимально ущільненому баласті швидкість поширення пружної хвилі удару становить 318 м/с.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						45
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ІЗ ЗМЕНШЕННЯ РОЗЛАДНАННЯ ЩЕБЕНЕВОГО БАЛАСТУ КОЛІЇ ПІСЛЯ РОБОТИ МАШИНИ ВПО-3000

4.1. Методи зменшення сил тиску на баластний шар залізничної колії

Основними факторами, що впливають на величину осідання баласту в умовах експлуатації є величина осьового навантаження, конструкція верхньої будови колії, експлуатаційні та кліматичні умови.

Також вагомим фактором є забрудненість баласту, і при перевищенні 30%, відбувається розладнання колії, що потребує повного очищення щебеневого баласту колії.

Покращити верхню будову колії можна за рахунок збільшення площі контакту шпали із поверхнею баластної призми.

На залізницях світу часто використовується метод здвоєння шпал, або використання широких шпал [33]. Також використовують варіант здвоєної шпали, з посиленням опору поперечному зсуву, що має велике значення під час експлуатації безстикової колії.

Є досвід укладання широких шпал впритул один до одної [34]. Такий спосіб максимально зменшує тиск на баласт. Проте при такому способі ускладнюється технологія виправлення колії при поточному утриманні та виконанні різних ремонтів.

Відомий також досвід застосування шпал-лежнів для трамвайних колій у Польщі [35]. Поздовжні бетонні балки виготовляються у спеціальних формах.

Для зменшення тиску на баласт і збільшення опору поперечному зсуву шпали у ряді випадків застосовується конструкція з Y-металевих шпал [36, 37, 38, 39]. Такі шпали підвищують поперечну стійкість колії при дії високих температур.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		46

Відомі конструкції рамних шпал [40, 41], що являють собою поєднання двох звичайних поперечних залізобетонних шпал і двох поздовжніх балок-лежнів. Вони з'єднуються між собою і утворюють прямокутну раму.

Спеціалісти вважають, що колія на рамних шпалах і плитному фундаменті добре використовується при будівництві нових ліній для руху поїздів із високою швидкістю та осьовими навантаженнями [42].

4.2. Вплив підбивки баласту на розладнання геометрії колії

Слід зазначити, що після виправки колії (підбивки) досягаються зміни у якості колії, що у ряді випадків призводить до збільшення інтенсивності її розладнання.

На рис. 4.1 наведено результати вимірювань геометрії колії на дослідних ділянках шведських (SJ) та швейцарських залізницях (SBB). Досліджується покращення геометрії колії по рівню та в плані для двох методів підбивки, перший – з стабілізацією та другий – без стабілізації, у залежності від геометричного стану колії до ремонту.

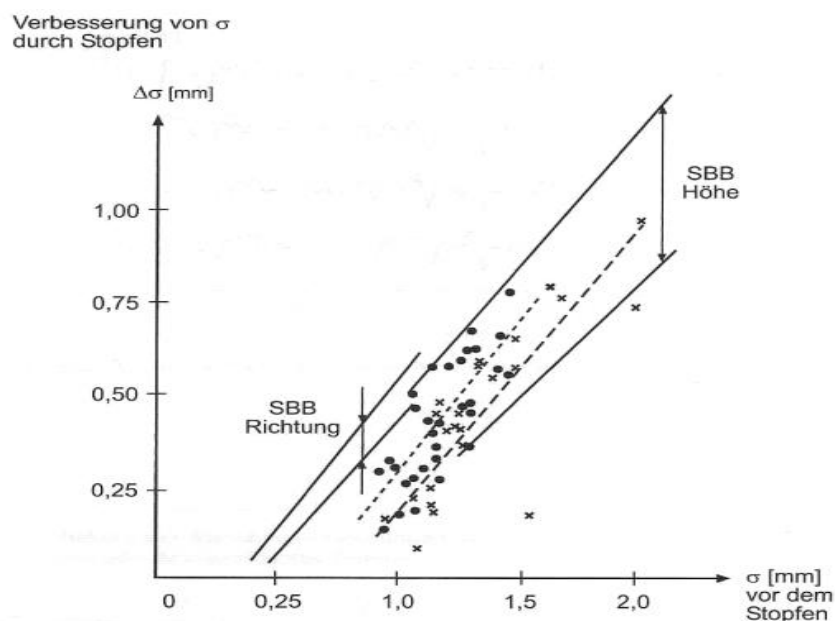


Рисунок 4.1 – Результати вимірювань вертикального профілю (SBB, SJ), та плану (SBB) після підбивки [43]: пунктирною лінією показано лінії тенденції для SJ, суцільною – для SBB, хрестик відповідає підбивці зі стабілізацією, кружечок – без стабілізації колії

Із рис. 4.1 видно, що за допомогою підбивочних машин можна покращити геометрію колії. При цьому, при зростанні величини нерівності високоякісну конструкцію колії можна привести на вищий початковий рівень якості за допомогою підбивочних машин. Наприклад, якщо колія знаходиться при середньоквадратичному відхиленні 2 мм перед підбивкою, то покращити стан колії можна приблизно на 1 мм – це відповідає покращенню у два рази.

Із натурних досліджень вчених, що наведені у праці [44] встановлено статистичний взаємозв'язок між якістю колії до підбивки та після підбивки. Залежність стану залізничної колії до та після підбивки апроксимується лінійною залежністю, що наведена на рис. 4.2.

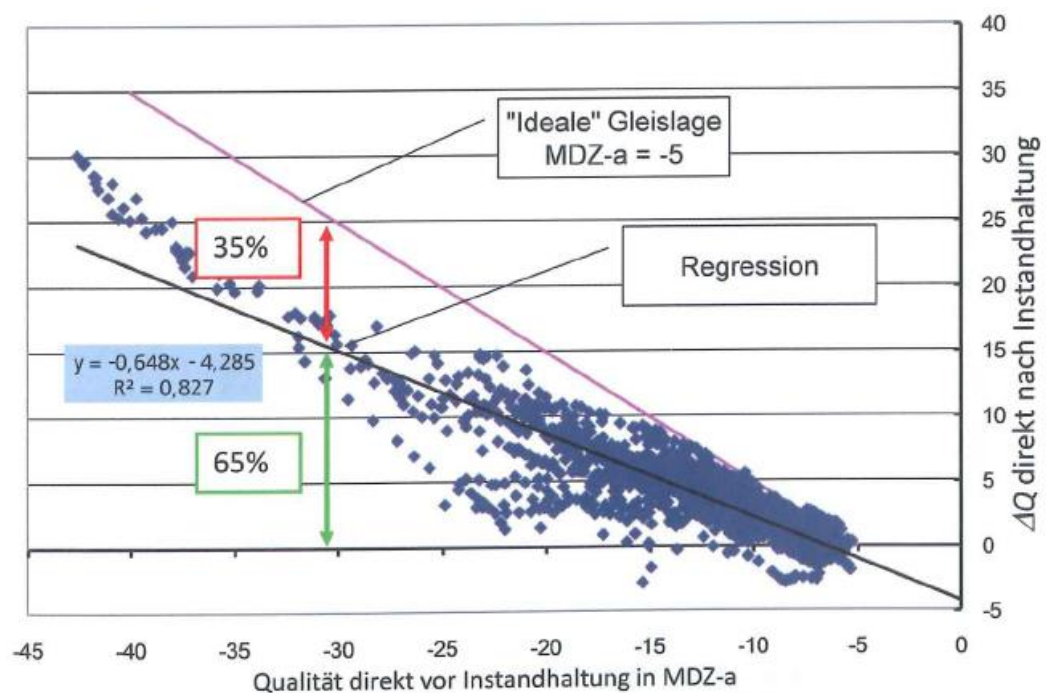


Рисунок 4.2 – Залежність технічного стану колії до та після підбивки баласту [44]

У результаті досліджень авторами встановлено, що при кращому початковому стані колії можна досягнути «ідеальної якості» більш швидко. І навпаки чим гіршою є початкова якість перед виправочними роботами, тим більшого покращення можна досягнути за довший час.

Звідси випливає, що при плануванні ремонтів залізничної колії необхідно дотримуватись термінів проведення очищення та підбивки баластної призми.

Дослідження, що опубліковані у роботі [45], які були проведені на мережі угорських залізниць MÁV Rt. на п'яти залізничних лініях, дозволили встановити взаємозв'язок стану колії до ремонту та після ремонту. Встановлено, що цей зв'язок є нелінійним (рис. 4.3).

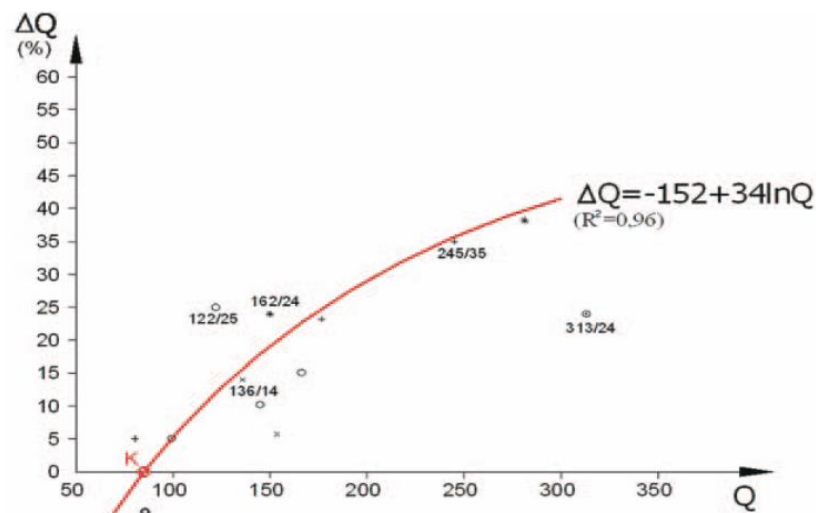


Рисунок 4.3 – Ефективність покращення геометрії колії до та після підбивки баласту [45]

Відповідно до отриманих результатів досліджень встановлено, що позитивний результат робіт MDZ сильно зменшується при задовільному стані залізничної колії, а при дуже доброму стані колії – спричиняє негативний результат.

Виконавши дослідження впливу послідовності підбивок на роботу колії, у роботі [46] автором було висунуто теорію збіжності якості колії. Вона полягає в тому, що задані межі якості колії можна досягнути через відповідні цикли поточного утримання колії. Де взаємозв'язок між інтенсивністю погіршення, бажаними межами якості колії та необхідним числом циклів підбивки дається залежністю:

$$X = \frac{D}{W} \cdot \frac{1}{1-K}, \quad (4.1)$$

де D – інтенсивність погіршення, що може бути прийнята за результатами проходження вагона-колієвимірювача або розрахована за теоретичною моделлю [46]; W – кількість підбивок; K – параметр якості роботи підбивочної машини.

На рис. 4.4 графічно пояснюється зміст формули (4.1). На ньому наведено дві взаємопов'язані діаграми взаємозв'язку геометричного стану колії до ремонту та після ремонту (4.4, а) та часового розвитку якості геометрії (рис. 4.4, b).

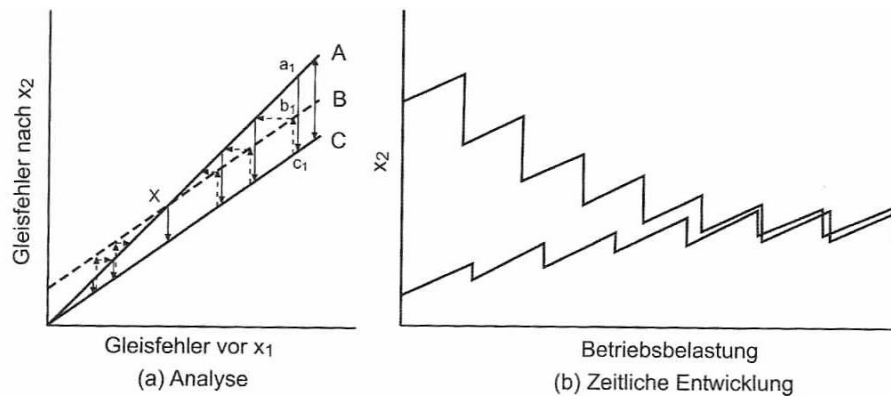


Рисунок 4.4 – Графіки стану колії залежно від параметру якості роботи колії, частоти поточного утримання і бажаної якості колії [46]

Дві стрибкоподібні лінії, що наведені на рис. 4.4 відповідають різному початковому геометричному стану колії. При умові однакової інтенсивності розладнання в обох випадках та однакового ступеню розладнання між підбивками через деякий час буде досягнуто в цих випадках однакового геометричного стану залізничної колії.

Автором у роботі [47] доведено, що поведінка колії після підбивки баласту має широкий спектр можливої роботи, як у кращу так і гіршу сторону. Лише у найкращому випадку інтенсивність розладнання після підбивки може бути такою самою, як і до заходу, як приймається у вченого Сато (рис. 4.5).

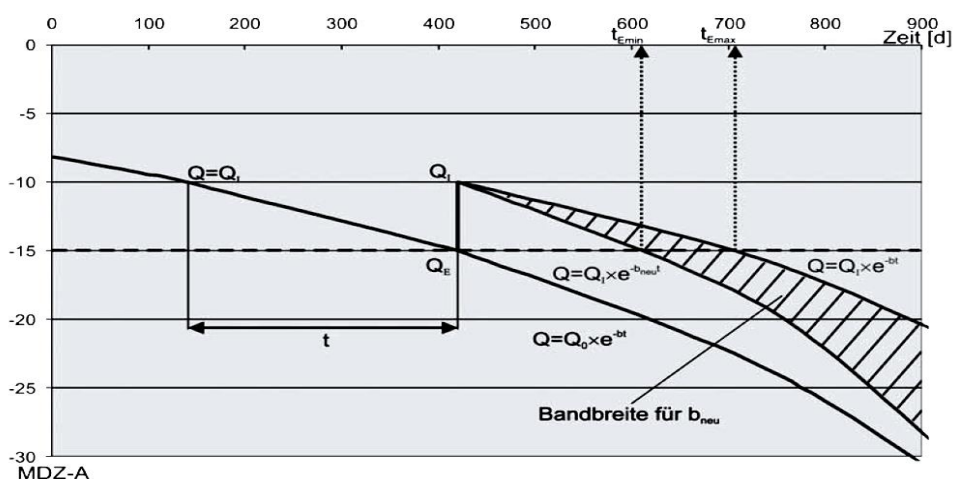


Рисунок 4.5 – Поведінка стану залізничної колії після підбивки [47]

Натурні дослідження, що наведені у роботі [44] підтверджують теорію збіжності Сато. Відповідно до якої при багатьох циклах підбивки баласту підряд вдається поступово підвищити якісний стан колії (рис. 4.6).

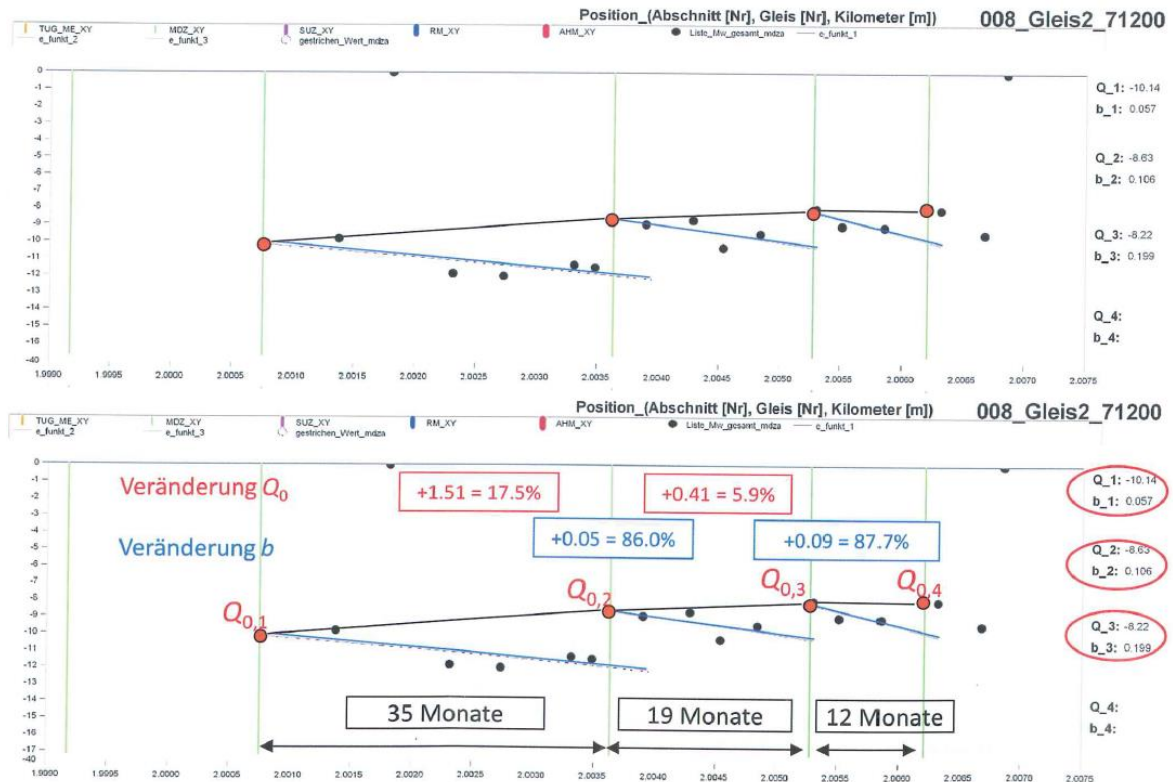


Рисунок 4.6 – Графіки підвищення інтенсивності розладнання колії із врахуванням ефекту ранньої підбивки баласту [44]

Із рис. 4.6 видно, що інтенсивність розладнання колії після кожної проведеної підбивки зростає приблизно на 90 %, що означає все швидше розладнання геометрії колії. Якщо продовжити відображену на рис. 4.6 дійсну поведінку розладнання колії неперервно без використання машин, тоді на рис. 4.7 отримаємо, що після 10 років досягається значення Q=-18 MDZ-а одиниць.

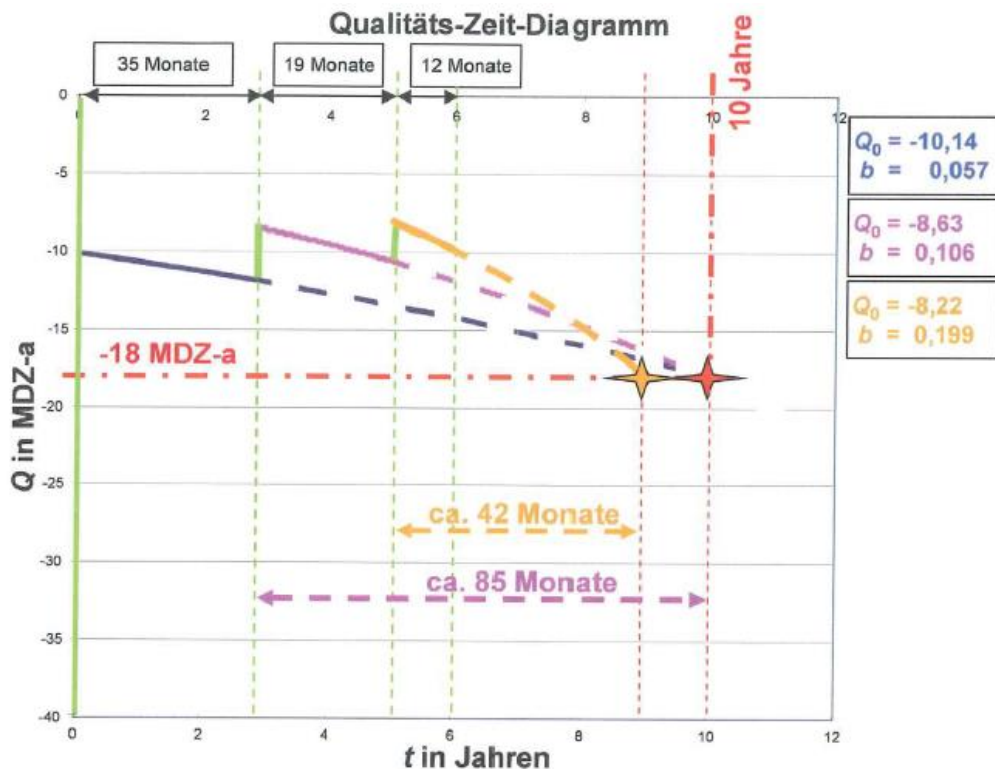


Рисунок 4.7 – Графік теоретичних досліджень функції розладнання колії із реальними значеннями розладнання [44]

Після того, як колія через 35 місяців, не дивлячись на незначну інтенсивність розладнання, була виправлена за допомогою заходу поточного утримання (MDZ), другий стрибок розладнання (лінія рожевого кольору) досягає прийняте значення $Q = -18$ MDZ-a одиниць приблизно після 85 місяців і таким чином попадає практично в той самий часовий пункт, як і перша лінія розладнання (синього кольору).

Виходячи з цього, було доповнено твердження Сато наступним чином [44]: «за допомогою цілеспрямованого застосування машин (MDZ) геометрична якість колії може бути підвищена. Однак при цьому потрібно очікувати щоразу суттєвішого підвищення інтенсивності розладнання».

Якщо колія дуже швидко погіршується, то за допомогою раннього втручання, виконання стабілізаційної підбивки колії, можна досягнути суттєвого покращення геометрії колії. Проте при задовільному технічному стані колії краще утриматися від застосування додаткової підбивки, оскільки укріплена структура баластного шару та наявне зубчате зчеплення частинок при втручанні можуть бути послаблені. У результаті це призведе до погіршення технічного

утримання геометрії колії. Проведеними дослідженнями отримано, що колія з інтенсивністю розладнання b , що становить менше 0,1 дуже добре поводиться, а з інтенсивністю розладнання b , що є більше 0,25 – дуже погано. У проміжному діапазоні повинне бути зроблене рішення, чи стабілізаційну підбивку виконувати у відповідності до місцевих умов, чи можна обійтися без ранньої підбивки колії (рис. 4.8).

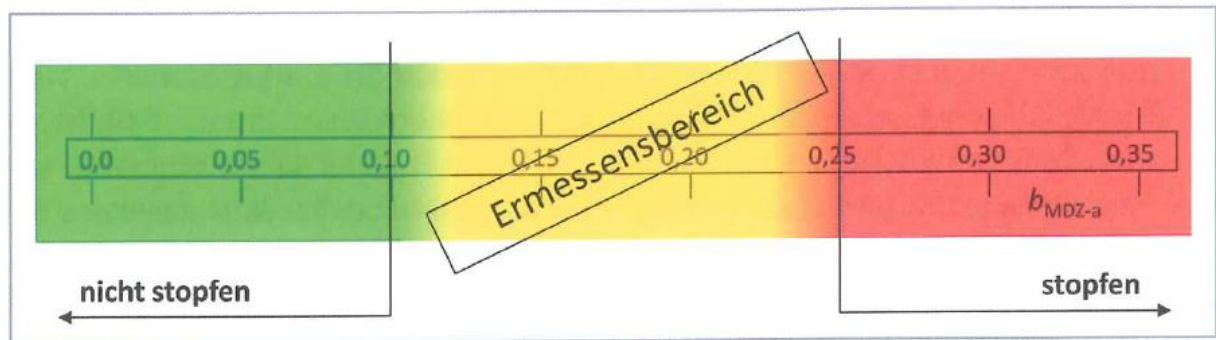


Рисунок 4.8 – Графік рекомендацій по виконанню стабілізаційної підбивки залізничної колії [44]

Вибір оптимальної часової точки виконання стабілізаційної підбивки виконується за допомогою статистичного аналізу, у якому співставляються ділянки колії безпосередньо після нового вкладання (рис. 4.9).

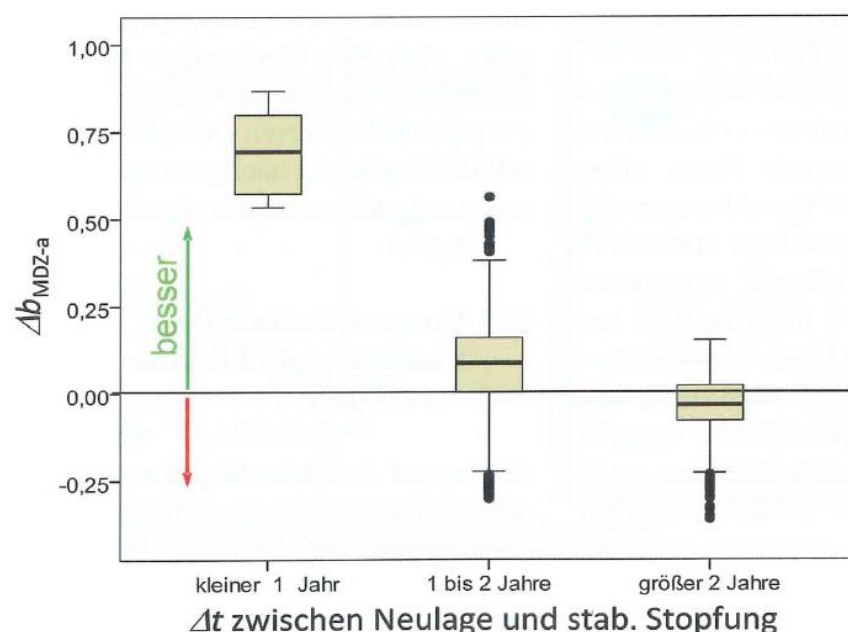


Рисунок 4.9 – Зміна інтенсивності розладнання колії (Δb_{MDZ-a}) при стабілізаційній підбивці у залежності від часу між новим вкладанням та першим процесом підбивки [44]

Цей рисунок показує, що суттєве покращення інтенсивності розладнання можна досягнути до певного моменту часу, який становить 1-2 роки. Після двох років експлуатації, впливу на інтенсивність розладнання колії може не бути, або може бути негативний вплив, що пояснюється "ефектом ранньої підбивки". Авторами дається рекомендація щодо ущільнення вимірювальних проїздів безпосередньо після нового вкладання для своєчасного виявлення ділянок з різним розвитком якості.

У дослідженнях TU Dresden встановлено, що часте виконання підбивки не є практичним. На рис. 4.10 показано збільшення інтенсивності осідань при виконанні підбивок та очищення баластної призми.

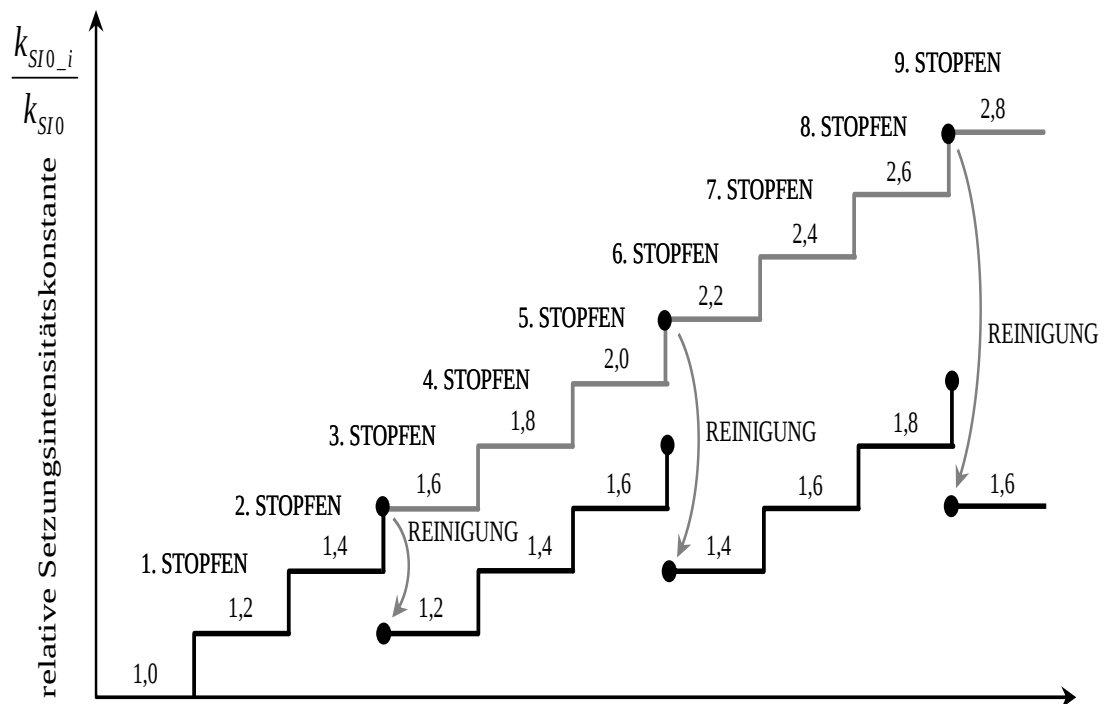


Рисунок 4.10 – Відносна інтенсивність осідань баласту у залежності від підбивок та очищення [48]

При виконанні очищення щебеню щебенеочисними машинами процес збільшення інтенсивності зменшується, однак повністю у початковий стан не повертається. Це пояснюється відокремленням дрібної фракції забруднювачів, однак не відновленням форми зерен, яка залишається округленою.

Висновки до розділу 4

Із проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Довговічність роботи баластного шару залізничної колії можна досягти за допомогою виконання вчасних робіт по виправці колії у плані та профілі із очищенням та підбиванням баластного шару машинами ВПО-3000.

2. Інтенсивність розладнання геометрії колії залежить від ступеню забрудненості баластного шару та конструкції верхньої будови колії. Найбільшого впливу мають підрейкові опори (шпали), через які передається тиск на баластний шар.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						55
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Основні наукові результати та висновки магістерської роботи полягають у наступному:

1. Основним матеріалом для баластного шару залізничної колії являється щебінь. Ефективність робіт виконуваних виправочно-підбивочно-рихтовочними машинами ВПО-3000 визначається забезпеченням нормативного ступеню ущільнення баласту у процесі виконання ремонтів колії.

2. Ущільнення щебеневої баластної призми машинами – це важлива складова технологічних процесів ремонту та поточного утримання колії. Операції із ущільнення щебеневої баластної призми є заключними операціями, що визначають якість виконання всього комплексу робіт. Вони виконуються в суміщенні за часом і місцем виконання з іншими операціями на колії.

3. Встановлено, що швидкість поширення пружних хвиль удару при неущільненому баласті становить 171 м/с, при проміжному ущільненні – 207 м/с та при максимально ущільненому баласті швидкість поширення пружної хвилі удару становить 318 м/с.

4. Встановлено, що при недостатньому ущільненню баласту сигнал значно втрачає потужність, що видно із часу проходження хвилі до крайніх датчиків, які знаходяться найближче до вільного кінця баластного плеча.

По швидкості та формі поширення хвилі можна судити про ступінь ущільнення баластного шару залізничної колії. При збільшенні ступеню ущільнення баластної призми збільшується швидкість поширення пружної хвилі у баласті.

5. Довговічність роботи баластного шару залізничної колії можна досягти за допомогою виконання вчасних робіт по виправці колії у плані та профілі із очищенням та підбиванням баластного шару машинами ВПО-3000.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		56

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Selig E. T. Track Geotechnology and Substructure Management - Thomas Telford / Selig E. T. and Waters J. M. – London, 20(1), 1994. – pp.39–61.
2. Indraratna B. Advanced rail geotechnology - Ballasted track / Indraratna B., Salim W. and Rujikiatkamjorn C. – Taylor and Francis Group, 2011. – pp. 1–410.
3. Ižvolt L. Tendencies in the development of operational quality of ballasted and ballastless track superstructure and transition areas / Ižvolt L., Šestáková J. and Šmalo M // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –236(1) 012038. – 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012038.
4. Atamanyuk A. Technology of ballast layer compaction by machines of type VPO in the process of deep ballast cleaning - PhD thesis, St. Petersburg State Transport University, St.-Petersburg, 2010.
5. Bastin, R. Development of German non-ballasted track forms [Text] // ICE. – UK.– 2005.
6. Em.o. Prof. Dr.–Ing. J. Eisenmann, Univ.–Prof. Dr.–Ing. habil. G. Leykauf Feste Fahrbahn fur Schienenbahnen. Sonderdruck aus Beton Kalenltr.– Berlin, 2000.
7. Esveld, C. Evaluating track structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach [Text] / A. Zoeteman, C. Esveld // Delft University of Technology. World Congress on Railway Research. – Tokyo, 1999. – P. 1–9.
8. Esveld, C. Modern Railway Track, Second Edition [Text] // Delft University of Technology, 2001. – P. 12–26.
9. Esveld, C. Recent developments in slab track [Text] // Delft University of Technology, 2003. – P.10–13.
10. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А.М. Орловський, М.Б. Курган, В.О. Яковлев та інші. – Затверджено наказом Укрзалізниці від 01.03.2012 р. № 072-Ц. – К.: ТОВ "Поліграфсервіс", 2012. – 456 с. – (Нормативний документ Міністерства інфраструктури України).

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		57

11. Popp K. System Dynamics and Long-Term Behavior of Railway Vehicles, Track and Subgrade (Lecture Notes in Applied Mechanics; vol. 6). / K. Popp, W. Schiehlen. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. — 488 p.

12. Kira Holtzendorff. Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen. Dissertation. Technische Universität Berlin. — Berlin, 2003 D 83. — 130 s.

13. Pahnke U. Frequenzspektren des Schotteroberbaus / Ulf Pahnke, Frank Müller-Borutta Norbert Breitsamter // Eisenbahntechnische Rundschau, 2010. — №7-8. — S. 473-483.

14. Holger Kruse. Behandlung des Schotters als Vielkörper System mit wechselnden Bindungen / Holger Kruse, Karl Popp, Hans-Georg Matuttis [u.a.] // Eisenbahningenieur, 2001. — №2. — S. 30-34.

15. Holger Kruse. Zur Modellierung der Gleisdynamik / Holger Kruse, Karl Popp. // Eisenbahningenieur, 1999. — №11. — S. 39-43.

16. Handbuch für den Eisenbahnbetriebsleiter. Band 2 Infrastruktur der Eisenbahnunternehmen/ Technik der Betriebsanlagen / [Horst Krampe, Hartmut Biesenack, Wolfgang Fengler u.a.].— Leipzig GmbH, 2006. — 503 s.

17. Klotzinger E. Der Oberbauschotter. Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen / Erwin Klotzinger // Eisenbahntechnische Rundschau, 2007. — №03. — S. 120-125.

18. Тітов О. Юридична складова інтероперабельності залізничного транспорту України в контексті взаємин із країнами Європейського союзу/ О. Тітов / Українські залізниці. — 2014. — 18 грудня. — С.18.

19. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union.

20. Ткачено О., Гнатенко Д., Шелейко Т., Донченко А. Гармонізація як важливий аспект впровадження інтероперабельності на залізничному транспорті/ О.Ткачено, Д. Гнатенко, Т. Шелейко, Донченко А / Українські залізниці. — 2014. — 16 жовтня. — С. 38.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		58

21. Regulation (EU) No 1315/2013 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU.

22. Holzfeind J. Qualitätsverhalten von Gleisen – Effekte von Neulage und Instandhaltung / Jochen Holzfeind, Robert Hummitzsch // ZEVrail, 2010. – №5 (134). – S. 182-191.

23. D. Burns. Exhibitions travelling technics in Dallas and Muenster. Railway Gazette International, 2003, № 5, p. 269–274.

24. E. Klotzinger. Further development of mechanized ballast cleaning, RTR - Railway Technical Review 2-3/2002.

25. Sysyn M. Laboratory evaluation of railway ballast consolidation by the non-destructive testing / M. Sysyn, V. Kovalchuk, U. Gerber, O. Nabochenko, B. Parneta // Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 2019, 21 (2), pp. 81–88.

26. Nabochenko O., Sysyn M., Kovalchuk V., Kovalchuk Y., Pentsak A. and Braichenko S. (2019): Study railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer - Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, pp. 50-59, DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154864.

27. Sysyn M., Gerber U., Gruen D., Nabochenko O. and Kovalchuk V (2018): Modelling and vehicle based measurements of ballast settlements under the common crossing - European Transport - Trasporti Europei, (71), 1-25.

28. M. Catalina Orozco. Inversion method for spectral analysis of surface waves (SASW): In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. – Georgia Institute of Technology, 2003. – 287 p.

29. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). – URL: <http://www.masw.com/> (accessed 20.12.2015).

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		59

30. Nazarian S., Stokoe K.H., Hudson W.R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems // Transp. Res. Rec., Washington DC. – 1983. – Vol. 930. – P. 38–45.

31. Suto K. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction // Engineering Advances in Earthworks / Australian Geomechanics Society. – 2007. – P. 71–81.

32. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record // 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts. – 1998. – P. 1377–1380.

33. Kostjuk M. D. Modernisation of railway track structures on Ukrainian Railways: an overview. / M. D. Kostjuk // Rail Engineering International Edition. – 2010. – №2. – P. 12-15.

34. Сисин М. П. Вплив фізичних та геометричних характеристик залізничної колії на її напружено-деформований стан: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.06 / Сисин Микола Петрович. – Дніпропетровськ, 2008. – 254 с.

35. Esveld C. Modern railway track. / Coenrad Esveld. – [Second edition]. – MRT-Production, 2001. – 653 p.

36. Handbuch Das System Bahn. / [Markus Hecht, Eberhard Jänsch, Hans Peter Lang u.a.]. – Eurailpress TZ-Verlag & Print GmbH, Roßdorf, 2008. – 680 s.

37. Lothar Fendrich. Handbuch Eisenbahninfrastruktur. (Instandhaltung und Anlagenmanagement, Peter Veit). – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 990 s.

38. Гришечкин С. А. Двухпараметрический геоакустический контроль физико-механических свойств грунтов / Гришечкин С. А. // В кн.: Придніпровський науковий вісник. Машинобудування та технічні науки. Науковий журнал. – 1998. – №11 (78). – С. 36-40.

39. Фришман М. А. Исследование изменения вертикальной жесткости пути по его длине / Фришман М. А., Леванков И. С. // В кн.: Исследование взаимодействия пути и подвижного состава. – Днепропетровск, ДИИТ, 1972. – Вып. 138. – С. 48-57.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		60

40. Уманов М. І. "Проведення досліджень та розробка рекомендацій по визначенню ефективності використання динамічних стабілізаторів різних конструкцій при виконанні модернізації колії на довгостроково закритих перегонах" Тема № 23/07 □ ЦТех – 451/07 □ ЦЮ від 11 квітня 2007 р., державний реєстраційний номер № 0107U005237. – 2007. – 103 с.

41. Бондаренко І. О. Підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.06 / Бондаренко Ірина Олександрівна. – Дніпропетровськ, 2006. – 248 с.

42. Бондаренко И. А. К вопросу определения модуля упругости пути в вертикальной плоскости / Бондаренко И. А. // Транспортні системи і технології. – К.: КУЕТТ, 2004. – Вип. 5. – С. 16-27.

43. Lichtberger B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. / Lichtberger B. – Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003. – 318 s.

44. Holzfeind J. Qualitätsverhalten von Gleisen – Effekte von Neulage und Instandhaltung / Jochen Holzfeind, Robert Hummitzsch // ZEVrail, 2010. – №5 (134). – S. 182-191.

45. Horvat F. Streckenbewirtschaftung in Relation von Gleislagequalität zu Traktionsenergieverbrauch / Ferenc Horvat, Ferenc Kiss // Eisenbahntechnische Rundschau, 2006. – №11. – S. 798-805.

46. Lichtberger B. Track Compendium / Bernhard Lichtberger. – Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG 2005. – 634 p.

47. Veit P. Qualität im Gleis – Luxus oder Notwendigkeit? / Peter Veit // Eisenbahningenieur, 2006. – №12 (57). – S. 32-37.

48. Handbuch für den Eisenbahnbetriebsleiter. Band 2 Infrastruktur der Eisenbahnunternehmen/ Technik der Betriebsanlagen / [Horst Krampe, Hartmut Biesenack, Wolfgang Fengler u.a.].– Leipzig GmbH, 2006. – 503 s.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						61
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК РИСУНКІВ

Рисунок 1.1 – Графічна залежність осідань колії від величини пропущеного тоннажу

Рисунок 1.2 – Схема розподілу напружень в елементах колії на щебеновому баласті

Рисунок 1.3 – Поперечні профілі баластної призми: а, б, в – із щебеню при дерев'яних шпалах (а – на прямій одноколійній ділянці, б – в кривій, в – на прямій двоколійній ділянці); г, д, е, є – із щебеню при залізобетонних шпалах (г – на прямій одноколійній ділянці, д – в кривій, е – на прямій двоколійній ділянці, є – в кривій); ж – з кар'єрного гравію, черепашнику, піску при дерев'яних шпалах у кривій на двоколійній ділянці; $h_{шц}$ – товщина щебенового шару під шпалою; $h_{п}$ – товщина шару піщаної подушки; d – плече баластної призми; A – розширення міжколійя в кривій за умовами габариту [10]

Рисунок 1.4 – Результати дослідження осідання баласту при дії циклічних вібраційних навантажень [11]

Рисунок 1.5 – Результати дослідження осідань баласту при відсутності люфту під шпалою при заданні 25000 циклів циклічного навантаження [11]

Рисунок 1.6 – Осідання шпали при заданні статичного привантаження та дії вібраційного прискорення [11]

Рисунок 1.7 – Прискорення у щебеновому баласті при швидкості рухомого складу 70 км/год із врахуванням ухилу нерівності та конструкції колії: 1 - дерев'яні шпали, 2 - залізобетонні шпали [16]

Рисунок 1.8 – Графіки зміни прискорень, тиску колеса на рейку і рейки на шпали у залежності від швидкості рухомого складу і ухилу нерівності $i=8\text{ ‰}$ при: 1 – залізобетонних шпалах, 2 - дерев'яних шпалах [16]

Рисунок 1.9 – Зниження несучої здатності забрудненого щебенового баласту при перезволоженому земляному полотні [17]

Рисунок 1.10 – Правове технічне регулювання на залізницях Європейського Союзу

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		62

Рисунок 1.11 –Правове технічне регулювання на залізницях України

Рисунок 2.1 – Розрахункова схема до визначення відносного осідання баласту в експлуатації у залежності від ущільнення

Рисунок 2.2 – Процес ущільнення баласту машиною ВПО-3000

Рисунок 2.3 – Технологічний процес очищення баластного шару залізничної колії машиною ВПО-3000

Рисунок 2.4 – Процес формування ущільненого баластового шару залізничної колії машиною ВПО-3000

Рисунок 2.5 – Характерні зони ущільнення баластної призми колії

Рисунок 2.6 – Вид машини ВПО-3000

Рисунок 2.7 – Технологічний процес очищення щебеню за допомогою машини ВПО-3-3000С

Рисунок 2.8 –Робочі органи машин ВПО-3000 горизонтально напрямленої дії при ущільненні баласту колії

Рисунок 3.1 – Пряма та зворотня задача методу SASW

Рисунок 3.2 – Методика дослідження параметрів поверхневих хвиль методом SASW

Рисунок 3.3 – Схема із дослідження поширення хвиль удару методу MASW

Рисунок 3.4 – Машина горизонтально-напрямленої дії, що моделює роботу машини ВПО-3000

Рисунок 3.5 – Процес підбиття щебеню прототипом машини ВПО-3000

Рисунок 3.6 – Вид датчика прискорень ADXL 335

Рисунок 3.7 – Схема до визначення поширення пружних хвиль удару

Рисунок 3.8 – Процес запису поширення пружних хвиль удару

Рисунок 3.9 – Траєкторії руху щебинок баласту у процесі ущільнення баласту

Рисунок 3.10 – Поширення вертикальних хвиль удару при розущільненому щебеновому баласті

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		63

Рисунок 3.11 – Поширення вертикальних хвиль удару при проміжному ущільненню щебеневого баласту

Рисунок 3.12 – Поширення вертикальних хвиль удару при максимальному ступені ущільнення баласту

Рисунок 3.13 – Схема до розрахунків швидкості поширення пружних хвиль удару

Рисунок 3.14 – Результати дослідження швидкостей поширення пружних хвиль удару у щебеновому баласті після підбивки прототипом машини ВПО-3000

Рисунок 4.1 – Результати вимірювань вертикального профілю (SBB, SJ), та плану (SBB) після підбивки [43]: пунктирною лінією показано лінії тенденції для SJ, суцільною – для SBB, хрестик відповідає підбивці зі стабілізацією, кружечок – без стабілізації колії

Рисунок 4.2 – Залежність технічного стану колії до та після підбивки баласту [44]

Рисунок 4.3 – Ефективність покращення геометрії колії до та після підбивки баласту [45]

Рисунок 4.4 – Графіки стану колії залежно від параметру якості роботи колії, частоти поточного утримання і бажаної якості колії [46]

Рисунок 4.5 – Поведінка стану залізничної колії після підбивки [47]

Рисунок 4.6 – Графіки підвищення інтенсивності розладнання колії із врахуванням ефекту ранньої підбивки баласту [44]

Рисунок 4.7 – Графік теоретичних досліджень функції розладнання колії із реальними значеннями розладнання [44]

Рисунок 4.8 – Графік рекомендацій по виконанню стабілізаційної підбивки залізничної колії [44]

Рисунок 4.9 – Зміна інтенсивності розладнання колії ($\Delta bMDZ-a$) при стабілізаційній підбивці у залежності від часу між новим вкладанням та першим процесом підбивки [44]

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		64

Рисунок 4.10 – Відносна інтенсивність осідань баласту у залежності від підбивок та очищення [48]

СПИСОК ТАБЛИЦЬ

Таблиця 1.1 – Допуски утримання колії в плані

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
						65
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

АНОТАЦІЯ І КЛЮЧОВІ СЛОВА

Дипломна магістерська робота складається з 4 розділів та загальних висновків. Робота включає 43 рисунка та 1 таблицю. Загальний обсяг дипломного проекту становить 68 сторінок. Кількість використаних літературних джерел – 48.

Об'єктом досліджень є баласт залізничної колії.

У магістерській роботі виконано аналіз конструкцій колії на щебеневому баласті та проаналізувати технологію ущільнення баласту колії машиною ВПО-3000. Проведено експериментальні дослідження ущільнення баласту прототипом машини ВПО-3000 у лабораторних умовах. Розроблено рекомендації, щодо підвищення довговічності баласту в експлуатації.

У результаті досліджень встановлено, що по швидкості та формі поширення хвилі можна судити про ступінь ущільнення баластного шару залізничної колії. При збільшенні ступеню ущільнення баластної призми збільшується швидкість поширення пружної хвилі у баласті.

Встановлено, що після підбиття баласту машиною ВПО-3000 отримуємо більш однорідний розподіл баласту під шпалою, на відміну від технології Plasser&Theurer, яка виконує локальне підведення баласту.

Встановлено, що швидкість поширення пружних хвиль удару при неущільненому баласті становить 171 м/с, при проміжному ущільненні – 207 м/с та при максимально ущільненому баласті швидкість поширення пружної хвилі удару становить 318 м/с.

Ключові слова: баластний шар залізничної колії, ВПО-3000; ступінь ущільнення, швидкість поширення пружної хвилі.

ABSTRACT AND KEYWORDS

Degree Master's work consists of four chapters and overall conclusions. The work includes 43 figures. The total amount of the degree project 68 pages. The amount of used literature sources – 48.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		66

In the master's work, the analysis of track structures on crushed stone ballast was performed and the technology of track ballast compaction with the VPO-3000 machine was analyzed. Experimental studies of ballast compaction by a prototype VPO-3000 machine were carried out in laboratory conditions. Recommendations have been developed to increase the durability of ballast in operation.

As a result of the research, it was established that the degree of compaction of the ballast layer of the railway track can be judged by the speed and form of wave propagation. When the degree of compaction of the ballast prism increases, the speed of propagation of the elastic wave in the ballast increases.

It has been established that after ballasting with the VPO-3000 machine, we get a more uniform distribution of ballast under the sleeper, in contrast to the Plasser&Theurer technology, which performs local ballast feeding.

It was established that the speed of propagation of elastic shock waves with uncompacted ballast is 171 m/s, with intermediate compaction - 207 m/s, and with maximally compacted ballast, the speed of propagation of elastic shock waves is 318 m/s.

Keywords: ballast layer of a railway track, VPO-3000; degree of compaction, speed of elastic wave propagation.

					0041.216529.ДР.2022.001	Лист
Із	Лист	№ докум	Підпис	Дата		67