

## ЗАЯВА

Я, Водарисакиї Костянтин  
(ПІБ повністю)

Студент групи 8-Інтер

Спеціальності 275 Залізничний транспорт  
(код та назва спеціальності)

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

Освітнього ступеня підготовки магістр

Заявляю, що моя випускна кваліфікаційна робота на тему:

Дослідження можливості використання функційної копії при її функціонуванні у вигляді наваг статів і сигналів до вимог міжнародного стандарту IIR 67711.

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

Дата 25.11.2021

Підпис

Керівник

Підпис

д.т.ч. Ковальчук В.В.  
(ПІБ керівника)

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**Днепровский национальный университет железнодорожного**  
**транспорта имени академика В. Лазаряна**  
**Кафедра «Транспортная инфраструктура»**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ ШКОЛА МАСТЕРСТВА И ПРОФЕССИЙ**  
**СНАМ, ФРАНЦИЯ**

«К ЗАЩИТЕ ДОПУЩЕНО»

Заведующий кафедрой:

д.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Тютюкин А. Л.  
(уч. звание, степень) (подпись) (ФИО)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
**К ДИПЛОМНОЙ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЕ**

на получение ОКУ «магистр»

Направление 27 «Транспорт»

Специальность 273 «Железнодорожный транспорт»

Специализация «Интероперабельность и безопасность на железнодорожном  
транспорте»

Тема **Исследование плотности щебеночного балласта железнодорожного пути**  
**при воздействии динамических циклических нагрузок в соответствии с**  
**требованиями международного стандарта IRS 677131.**

Выполнил:

\_\_\_\_\_ Водзянский Иван Зиновьевич  
(подпись) (фамилия, имя, отчество)

Руководитель:

д.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Ковальчук В. В.  
(уч. звание, степень) (подпись) (фамилия и инициалы)

Днепр

2021

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		1

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СЛОВАРЬ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

ЕС	Европейский Союз.
РШР	Рейко-шпальная решетка.
НДС	Напряженно-деформированное состояние.
МСЕ	Метод конечных элементов.
ТСИ	Технические Спецификации интероперабельности.
EN	Европейский стандарт.
АСУ	Автоматизированная система управления.
ДБН	Государственные строительные нормы.
СН	Строительные нормы.
DGS	Динамический стабилизатор пути.

Балластный слой    Материал, заполняющий пространство между нижней железной дороги    постеллю шпал (или других рельсовых опор) и земляным полотном, а также за торцами шпал и в шпальных ящиках.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		2

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВСТУПЛЕНИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>1. ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ УКРАИНЫ И ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА К БАЛЛАСТНОМУ СЛОЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПУТИ .....</b>	<b>9</b>
1.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БАЛЛАСТНЫМ МАТЕРИАЛАМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ .....	9
1.2. ГРАВИЙНЫЙ И ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНЫЙ БАЛЛАСТ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ.....	12
1.3. ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ СТРАН ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА К БАЛЛАСТНОМУ СЛОЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	13
1.4. ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ.....	16
Выводы к разделу 1.....	21
<b>2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....</b>	<b>23</b>
2.1. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	23
2.2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН УДАРА В УПРУГОЙ СРЕДЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТРАНАХ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА .....	24
2.3. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН УДАРА SPECTRAL ANALYSIS SURFACE WAVES СТРАН ЕС .....	25
2.4. МЕТОД МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES СТРАН ЕС.....	28
2.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКА ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....	30

					0053.206515.ДР.2021.001			
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Исследование плотности щебеночного балласта железнодорожного пути при воздействии динамических циклических нагрузок в соответствии с требованиями международного стандарта IRS 677131.	Лит	Лист	Листов
Разраб		Водзянский И.З.						
Проверил		Ковальчук В.В						
Н. контр.								
Утвердил		Тютюкин А.Л.						

Выводы в раздел 2.....	36
<b>3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ IRS 677131.....</b>	<b>38</b>
3.1. ТРЕБОВАНИЯ ЕВРОПЕЙСКИХ НОРМ IRS 677131 ОТНОСИТЕЛЬНО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ БАЛЛАСТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ .....	38
3.2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	39
3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ .....	40
3.3.1. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УПЛОТНЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА .....	41
3.3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ И УСКОРЕНИЙ В БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЕ.....	41
3.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН УДАРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА.....	48
Выводы к разделу 3.....	49
<b>4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЕГО ПЛОТНОСТИ .....</b>	<b>50</b>
4.1. АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАБОТЫ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	50
4.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УПЛОТНЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	52
4.3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	53
Выводы к разделу 4.....	55
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>56</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>58</b>

<b>СПИСОК РИСУНКОВ .....</b>	<b>63</b>
<b>СПИСОК ТАБЛИЦ .....</b>	<b>68</b>
<b>АННОТАЦИЯ И КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА .....</b>	<b>67</b>

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		5

## ВСТУПЛЕНИЕ

Интероперабельность железнодорожного транспорта Европейского Союза определяется как способ обеспечения безопасности движения на любом направлении сети железных дорог, то есть это те усилия, которые направлены на то, чтобы сделать возможной эксплуатацию всех возможных технических систем железных дорог, которые существуют на европейском континенте.

Реформирование системы железнодорожного транспорта сегодня является первым шагом на пути к институциональной адаптации железнодорожного транспорта Украины к стандартам Европейского Союза. Прежде всего реформирования требует качественного совершенствования законодательной базы и организационной структуры, а для этого необходим системный и комплексный подход.

Технический регламент безопасности инфраструктуры [1], который разработан в соответствии с Европейскими требованиями (Директивы 2001/14/ЕС и 2004/49/ЕС, 2008/57/ЕС), определяет основные требования к проектированию, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации объектов железнодорожного транспорта.

Согласно технического регламента [1] инфраструктура железнодорожного транспорта и ее элементы должны содержаться и эксплуатироваться в соответствии с утвержденными в установленном порядке правил содержания соответствующих объектов такой инфраструктуры.

Одной из задач для ОАО «Укрзалізниця» для подсистемы «Инфраструктура» является разработка Технологического регламента диагностики уплотнения балластного слоя, который предусматривает мониторинг балластного слоя использованием инструментальных методов и мобильных средств, что позволит оценить его реальное состояние и обеспечить безопасность в соответствии с требованиями Директивы, Технического регламента и других норм.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		6

В данной работе выполняется анализ нормативных документов стран ЕС и Украиной, в которых отражены требования к плотности балластного слоя, оценки состояния балластного слоя с целью адаптации их к условиям украинских железных дорог для обеспечения качественного функционирования системы управления безопасностью железнодорожного транспорта и проведены лабораторные экспериментальные исследования по определению степени уплотнения балласта железнодорожного пути в зависимости от его степени уплотнения. Также даны рекомендации по повышенным сроком службы щебеночного балласта железнодорожного пути.

**Актуальность темы.** Рентабельность и экономичность балластной пути зависит от оптимального подбора параметров конструкции верхнего строения пути, при котором суммарные приведенные капитальные и текущие расходы будут минимальными. В основе таких расчетов лежит оценка продолжительности жизненного цикла пути и отдельных ее элементов, особенно щебеночного балластного слоя.

Продолжительность жизненного цикла балластной пути, прежде всего, зависит от работы одного из основных ее компонентов, а именно, балластного слоя. Неравномерные осадки балластного слоя приводят к разладананию геометрии пути, в дальнейшем влияет на жизненный цикл всех элементов пути, вследствие повышенных динамических нагрузок подвижного состава.

Механизм возникновения неравенства геометрии пути вследствие накопления остаточных деформаций балластного слоя является сложным и многогранным.

На неравномерные осадки щебеночного балластного слоя влияют многие факторы конструкции верхнего строения пути, свойств земляного полотна, характеристик подвижного состава, условий эксплуатации и местных атмосферных воздействий [2].

В робта предлагается путем регистрации и последующего анализа параметров волновых процессов, возникающих в щебеночном балластном слое

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		7

железнодорожного пути давать оценку фактического состояния уплотнения балласта и кроме этого проводить оценку несущей способности щебеночного балласта и механизм прогнозирования дальнейшего расстройство геометрии пути в зависимости от уплотнения щебеночного балласта.

**Цель исследования.** Целью магистерской работы является исследование плотности щебеночного балласта железнодорожного пути при воздействии динамических циклических нагрузок в соответствии с требованиями международного стандарта IRS 677131.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать основные конструкции железнодорожного пути на балластном слое;
- проанализировать требования международного стандарта IRS 677131 до плотности балластного слоя железнодорожного пути;
- провести экспериментальные исследования плотности балластного слоя при воздействии динамических циклических нагрузок в лабораторных условиях;
- разработать рекомендации по определению плотности балластного слоя.

**Объект исследований** – щебеночный балластный слой железнодорожного пути.

**Предмет исследований** – плотность щебеночного балласта железнодорожного пути при воздействии динамических циклических нагрузок.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		8

## РАЗДЕЛ 1

# ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ УКРАИНЫ И ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА К БАЛЛАСТНОМУ СЛОЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПУТИ

### 1.1. Общие требования к балластным материалам железнодорожного пути

На железных дорогах Украины геометрические требования к нормальным размерам щебня и допустимых отклонений от них формулируются согласно ГОСТ 7392 - 85 [3] с размером зерен 25-60 мм. Прочность щебня определяется по его свойства истиранию, то есть потери массы при испытании в барабане шаровой мельнице в процентах от начальной массы. По этому показателю щебень делится на три градации И20, И40, И50. Также используется относительный показатель прочности на удар, который получается при испытании в копре и делится от высокой к слабой прочности на марки У75, У50 и У40 [3].

Согласно [4, 5] железобетонные шпалы укладываются только на балласт из твердых пород щебня марок не ниже В-50 и И-40. Мелкий щебень фракций 5-25мм и балласт из других материалов может применяться для второстепенных путей при соответствующем обосновании.

На железнодорожный путь балластные материалы по происхождению, размерам частиц, их формы и способам обработки делятся на щебеночные, асбестовые, гравийные и песчано-гравийные.

К балластным материалам железнодорожного пути предъявляются определенные требования, которые можно изложить в следующих основных требованиях:

- быть прочными и твердыми и одновременно упругими;
- быть достаточно крупными и одновременно мелкими;
- иметь форму зерен близкую к кубической;

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		9

-мать зерна вытянутой формы;

-мать достаточное сопротивление взлому при действии нагрузок от подвижного состава железнодорожного транспорта.

*Щебеночный балласт.* Согласно ГОСТ 7392-85 [3] для главных путей железных дорог Украины применяется щебеночный балласт из фракций 25-60мм. Его вид приведена на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Вид железнодорожного пути на щебеночном балласте

К щебне, который вкладывается в главные пути железной дороги выдвигаются следующие требования:

- по зерновому складу – количество зерен крупностью от 60 до 70 мм ограничивается 5% по массе щебня, а более 70 мм – не допускается;

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		10

- зерен с крупностью 25 мм должно быть не более 5%, в том числе частиц щебня размером менее 0,16 мм – 1,5% по массе;

- по прочности – в качестве этого показателя принято истираемость щебня в процессе эксплуатации.

Для балластного слоя пути 1–3-го категорий должен применяться только щебень твердых пород марки И20 или У75.

На путях 4–5-й категорий может применяться щебень средней твердости марки И40 или У50;

- содержание зерен слабых пород допускается не более 10% по массе зерен с пределом прочности на сжатие в насыщенном состоянии не менее 20 МПа;

- содержание примесей – не допускается содержание глины в комках, почвы растительного происхождения и других органических примесей;

- по морозостойкости – в зависимости от количества циклов замораживания и оттаивания образцов щебня без разрушения щебень подразделяют на марки (ГОСТ 8267-82) Мр350 или Мрз25.

Щебень должен иметь хорошие электроизоляционные свойства. Характеризующихся величиной электрической проводимости насыщенного раствора, образованного при растворении измельченного щебня в дистиллированной воде.

В настоящее время введены дополнительные требования к щебню балластировки путей 1-3 классов, в том числе по содержанию плоских частиц, частиц с сверхнормативными размерами и др.

Также введена обязательная проверка гранулометрического состава щебня на базах путевых машинных станций.

Согласно нормативному документу ТУ 32 ЦП-782-92 [6] для балластировки железнодорожного пути можно использовать смесь песчано-щебеночных материалов (рис. 1.2).

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		11



Рисунок 1.2 – Смесь песчано-щебеночных материалов на железнодорожном пути

Требования к зерновому составу песчано-щебеночных материалов железнодорожного пути приведены в табл. I.

Таблица I – Зерновой состав материалов балласта

Размер чатинок мм	25	10	5	0.5
Остаток материалов на сите, %	До 20	До 60	3–75	40–95

Зерна размерами от 5 мм до 10 мм должны испытываться на прочность, то есть истираемость, а также на морозостойкость. Потеря массы должна быть до 30%, а минимальная килкость циклов замораживания-оттаивания не менее 25 циклов.

В смеси не должно быть частиц глины и других включений.

### **1.2. Гравийный и гравийно-песчаный балласт. Общие требования нормативных документов**

На станционных, подъездных и соединительных путях согласно ГОСТ 7394-85 [3] применяется гравийный и гравийно-песчаный балласт. Допускается также балластировки главных путей четвёртой категории (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Путь на песчаном балласте

Содержание кварцевых зерен и зерен прочных горных пород в песчаной части балласта (фракции размером от 0,16 до 5 мм) должно быть не менее 50% от массы этих фракций. Содержание зерен слабых горных пород (с пределом прочности при сжатии менее 20 МПа в водонасыщенном состоянии) в гравийной части балласта (более 5 мм) не должно превышать 10% от общей массы этих фракций.

Песок, который используется для песчаной подушки, должен быть дренирующим и иметь коэффициент фильтрации  $K_f > 0,5$  м/сут.

Следует отметить, что от качества уплотнения и состояния балластного слоя зависит интенсивность роста остаточных деформаций железнодорожного пути и объемы текущих и капитальных работ. В то же время на украинских и европейских железных дорогах именно балластный слой является наиболее применяемым элементом верхнего строения пути.

В развитых странах осуществляется даже промывка щебня перед укладкой в железнодорожный путь.

### **1.3. Требования нормативных документов стран Европейского Союза к балластному слою железнодорожного пути**

Геометрические требования к балластным материалам на железных дорогах Европы формулируются рекомендации ERRI D182 [7] и требованиями отдельных стран DIN EN 13450 и DBS 918 061 [8]. Наибольший диаметр зерен согласно инструкции DB AG находится в пределах между 22,4 и 63 мм.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		13

Физически частицы должны иметь как можно большее сопротивление против разламывания из-за высоких напряжений между зернами. Это сопротивление определяется, например, с помощью испытания Los Angeles Abrasion (LAA) Test [9]. Этот тест служит для определения прочности на излом природного камня. Образец размером около 10 кг помещают в специальный цилиндр, с многочисленными стальными шариками и вращают при 33 об./мин. 1000 раз вокруг своей оси. Затем пробу просеивают на сите с ячейкой 1,6 мм. Определяют величину LA:

$$LA = \frac{m}{M} \cdot 100, \quad (1.1)$$

где  $m$  – вес отсеяны фракции;  $M$  – вес пробы.

Чем выше LA- величина, тем ниже прочность к истиранию камня.

Как показали исследования низкое значение показателя истираемости LA у базальта.

Методика Los Angeles Abrasion является простой и быстрой методике испытаний, результаты зависят от многих параметров, поэтому авторы R thlisberger, Kurzen, D ppen, W rsch [10] обращают внимание на возможность ошибочной интерпретации при чисто статистической оценке.

Кроме Los Angeles Abrasion, существуют еще ряд тестов. Aggregate Impact Value (AIV) – это тест разбивания щебня под ударным нагрузкам [11]. Исследуемая проба состоит из сухого щебня фракции (10–14 мм). Пробу помещают в цилиндрический контейнер и создают динамическую нагрузку с помощью груза (14 кг), что напоминает пробу 15 раз с высоты 380 мм. Затем просеивают через сито с ячейкой 2 мм. AIV-Величину определяют по формуле:

$$AIV = \frac{m}{M} \cdot 100. \quad (1.2)$$

Чем выше AIV величина, тем ниже ударная прочность пробы. AIV-Тест сопоставляется с LA-Тестом через логарифмическое отношение. С увеличением AIV-величины, увеличивается величина LA.

С помощью Deval-теста (DH) определяют износостойкость щебеночного материала. Для определения износостойкости щебня на французских железных дорогах SNCF и др., засыпают щебень в косолежачий цилиндр диаметром 200мм

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		14

вместе со стальными шариками и заполнен водой (влажный Deval-тест). После 10000 оборотов, содержание цилиндра просеивают и исследуют. Исследуемая проба фракцией 25/50 мм должна составлять 7 кг в промытом и высушенном состоянии. После испытания, пробу просеивают через сито с ячейкой 1,6 мм. Затем определяют Deval-размер DH по следующей формуле:

$$DH = \frac{2800}{m}, \quad (1.3)$$

где  $m$  – масса отсеянная фракции, г.

Чем больше Deval величина DH, тем выше износостойкость материала.

Ударная прочность (Impact Resistance) по DIN 52-115 подобная AIV-теста, только используют фракцию щебня 35,5/45 мм. Проба при этом находится в контейнере цилиндрической формы. Динамическая нагрузка выполняется с помощью стандартного груза (50 кг) определенное количество раз (20 раз) с определенной высоты (380 мм).

Характерные параметры для различных пород показаны в нормативах [7, 11] и табл. II. Данные показатели хорошо характеризуют работу при эксплуатационной нагрузке от поездов, однако в исследованиях многих авторов большое влияние на измельчение балластного слоя имеют также работы по подкладке путевыми машинами [12].

Таблица II – Характерные параметры некоторых щебеночных пород

Щебеночный материал	LA	AIV	Impact Resistance	DH
Базальт	8,7-9,5	10	10,2-11,7	10,3-13,8
Порфирит (гранит)	10,3	10	11,9	11,1
Песчаник	12,5	11	14	9,8
Известняк	13,7-23	15-20	16,3-21,3	5,9

Как материал балласта, так и его гранулометрический состав оказывают значительное влияние на его деформационное поведение под нагрузкой. Угловатость щебня имеет большее влияние на процессы оседания, чем его свойство износостойкости.

На расстройство геометрии пути значительное влияние материала щебня и его гранулометрического состава подтверждается натурными испытаниями на сети австрийских железных дорог ÖBB учеными Holzfeind, Hummitsch, Veit

Института IEV [13, 14].

Для данных исследований были привлечены имеющиеся данные непосредственно с мест пути, на которых были проведены испытания балласта. Для того, чтобы минимизировать влияние других параметров, изменение интенсивности расстройство были исследованы только участки с одинаково выраженным параметром. Показателем расстройство пути было использовано обобщенный показатель качества геометрии пути, выраженный в MDZ-а единицах [15], который в ÖBB используется для планирования работы механизированных поездов для обработки пути (MDZ – "mechanisierter Durcharbeitungszüge»). В основе этого показателя возложена разница ускорений от всех видов неровностей на пути, усредненная в течение 100-200 м.

Полученный в ходе промежуточного контроля распределение зерен доставленного щебня в соответствии с EN 13450 были разделены на три главных класса 1, 2 и 3 и графически представляется линией гранулометрического состава (рис. 1.4). Эта классификация позволяет представления линии гранулометрического состава как однозначный параметр. После этого проводится анализ взаимосвязи между классами гранулометрического состава (SLK) и расстройство балластного слоя [13].

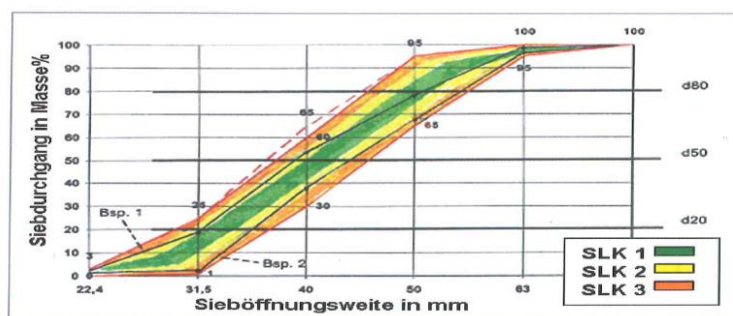


Рисунок 1.4 – Классификация гранулометрического состава в 1, 2 и 3 класса [13]

#### 1.4. Требования нормативных документов к проектированию балластной призмы на железных дорогах Украины

На существующих путях железных дорог Украины балластный слой может быть из следующих материалов: щебень, сортированный и карьерный гравий, ракушечник, песок. Все материалы должны удовлетворять требованиям

соответствующих государственных стандартов и технических условий на балластные материалы для железнодорожного пути.

На участках со скоростями движения поездов более 100 км/ч должен применяться только щебеночный балласт.

Железобетонные шпалы укладываются только на балласт из твердых пород щебня марок не ниже В-50 и И-40.

Балластная призма должна содержаться в соответствии с типовыми поперечных профилей (рис. 1.5 и рис. 1.6).

Толщина балластного слоя и размеры балластной призмы на главных путях на станциях, разъездах и обгонных пунктах принимаются в зависимости от установленных эксплуатационных условий и категорий путей согласно требованиям «Положения о проведении планово-предупредительных ремонтно-путевых работ на железных дорогах Украины», по нормами табл. III [4, 5].

Таблица III – Размеры балластной призмы на главных, станционных путях и стрелочных переводах

категория пути	Материал основного слоя	Конструкция балластной призмы	Толщина слоя балласта, м			Ширина, м	
			щебеночного, $h_{щ}$	гравийного или гравийно-песчаного, $h_{г}$	песчаной подушки, $h_{п}$	плеча балластной призмы, $d$	обочину земляного полотна, $n$
I-II	щебень	двухслойная	0,40	-	0,20	0,45	0,50
III	щебень	двухслойная	0,35	-	0,20	0,45	0,50
IV	щебень	двухслойная	0,30	-	0,20	0,40	0,50
V	щебень	двухслойная	0,25	-	0,20	0,35	0,50
V и VII, станционные	щебень	двухслойная	0,25	-	0,20	0,35	0,50
	гравийный, гравийно-песчаный	однослойная	-	0,45	-	0,35	0,50

Примечания: 1. При скалы крупнообломочных и песчаных дренирующих грунтах песчаную подушку можно не устраивать. 2. При укладке на путях V-VII категорий звеньевой пути ширина плеча балластной призмы составляет 0,25 м.

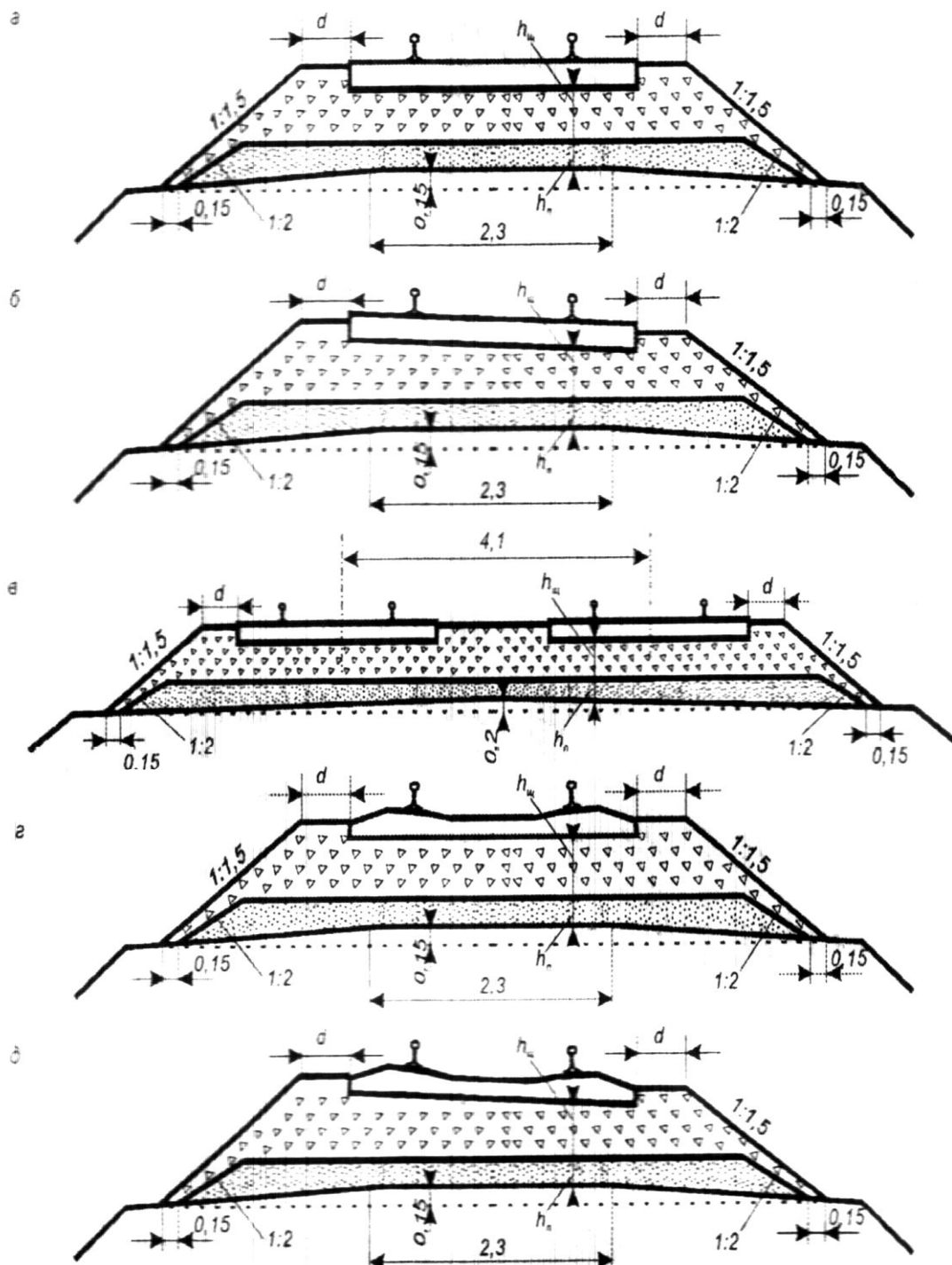


Рисунок 1.5 – Поперечные профили балластной призмы на однопутных участках железнодорожного пути [4]: а, б, в – из щебня при деревянных шпалах (а – в прямом однопутном участке, б – в кривой, в – на прямом двухпутном участке г, д – из щебня при железобетонных шпалах; г – на прямом однопутном участке, д – в кривой



При обосновании может заключаться мелкий щебень фракций 5-25 мм на песчаной подушке.

Междупутье на станционных путях заполняют тем самым балластом, которым баластуют пути. Однако при расстоянии между осями смежных станционных путей более 6,5 м, а на подходах к станции более 5 м, балластный слой смежных путей выполняют отдельно. В этом случае при глинистых почвах в земляном полотне необходимо предусматривать закрытый дренаж для отвода воды с междупутных пространства. Существующие междупутье могут оставаться незаполненными балластом до следующего капитального ремонта или модернизации пути.

В кривых участках балластную призму выполняют с учетом возвышения наружного рельса. Во внутренней рейкой толщина балластного слоя должна быть такой же, как на прямых участках.

В кривых радиусом менее 600 м балластную призму расширяют с внешней стороны на 0,1 м, а при числе путей более одной, кроме того, - на величину междупутных расстояний.

Крутизна откосов балластной призмы при всех видах балласта принимается 1:1,5, откосов песчаной подушки - 1:2.

В плановом порядке, при выполнении модернизации пути, капитальных и средних ремонтов, а также, по возможности, и при выполнении других видов путевых работ балластная призма должна приводиться к типичным профилям.

На линиях, где переход на типовые поперечные профили балластной призмы еще не осуществлен, сохраняются имеющиеся профили призмы. Откосы призмы должны быть при этом не круче 1:1,5 и, как исключение, 1:1,25.

Верх балластного слоя при железобетонных шпалах должен быть на одном уровне с верхней поверхностью средней части шпал.

При деревянных шпалах поверхность балластного слоя в подрельсовая зона должна быть ниже подошвы рельса на 3 см.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		20

Материал и размеры балластной призмы под стрелочными переводами устанавливаются как под примыкающими путями, а в случае различной категоричности путей, прилегающих к переводов, по той колее, имеющий более высокую категорию.

На сортировочных путях в пределах горок и горловин сортировочных парков укладывают щебень фракции 5–25 мм или гравийный балласт.

При движении поезда в элементах верхнего строения пути, в том числе в балластной слое, нарушаются вибрации различной интенсивности, негативное влияние которых заключается в росте силового воздействия на балласт и снижении его устойчивости в результате все большего подвижности зерен. Увеличение сил, направленных вниз, способствует расклинивается действия щебенки и повышению активности давления под подошвой шпалы. Засорители разъединяют зерна, с увеличением давления на балласт (в том числе и при повороте шпал) приводит к выдавливанию щебня в шпальные ящики. Динамические силы, направленные вниз, способствуют также проникновению частиц щебня в песчаную подушку.

Вертикальные ускорения, направленные вверх, уменьшают силы трения за счет нажатия частиц щебня друг на друга. Поэтому при отсутствии других видов связи между зернами требуется меньшее усилие для их перемещения, чем при отсутствии вибрации.

Горизонтальные динамические силы, вызывающие соответствующие горизонтальные ускорения, подобным же образом облегчают условия перемещения частиц в вертикальном направлении под действием вертикальных сил.

### **Выводы к разделу 1**

Из проведенного анализа технических требований нормативных документов Украины и Европейского Союза в балластного слоя, вытекают следующие выводы:

1. Наиболее распространенной конструкцией пути является путь на щебеночном балласте, как в Украине так и в странах Европейского Союза.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		21

2. Для стабильной и долговечной работы железнодорожного пути заключенного в балласт необходимо обеспечить нормативный степень уплотнения щебеночного балласта при строительстве железнодорожного пути.

3. В общем на работу балластного слоя и железнодорожного пути влияет большое количество внешних и внутренних факторов. Первичными внешними факторами являются три группы: факторы подвижного состава; факторы конструкции пути и факторы ремонта и содержания.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		22

**РАЗДЕЛ 2**  
**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ**  
**ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ**  
**ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

**2.1. Механизм разрушения балластного слоя железнодорожного пути в процессе эксплуатации**

Так как балластный слой является крупнозернистым материалом, практически невозможно создать полностью однородный балластный слой. Это можно увидеть после введения в эксплуатацию балластной пути, при которой после немногих проездов поездов возникает особое распределение люфтов [16-20]. Увеличение неравномерных просадок и таким образом увеличение люфтов в течение эксплуатации сильно зависит от величины неровностей от пути и подвижного состава (люфты, неровности рельсов, неровности колес), жесткости нижней строения пути, свойства материала, плотности щебеночного балластного слоя и качества балластной пути.

Пластические деформации балластного слоя при прохождении поездов делятся в две последовательные фазы [16]. Первая составляющая осадки отмечается сразу же после ввода в эксплуатацию колеи благодаря дальнейшему уплотнению структуры балластного слоя. В зависимости от качества строительства или в зависимости от переменной по длине плотности балластного слоя, это первоначальное оседания происходит на каждой шпале в большей или меньшей степени и сразу после первых проездов поездов затухает. В настоящее время существует много зависимостей, описывающих процесс оседания от количества циклов нагрузок и многих других факторов, среди которых чаще всего используются логарифмические, экспоненциальные, линейные зависимости, полученные в ходе лабораторных и натурных испытаний.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		23

В настоящее время исходят из того, что после тщательного устройства балластного слоя, а также дальнейшего уплотнения материала динамическим стабилизатором пути (DGS), образуется стабильный скелет зерен, при котором зерна в большой степени имеют контакт друг с другом. В этом состоянии структура показывает высокую вертикальную упругость и через собственный напряженное состояние в горизонтальном и вертикальном направлениях, в первую очередь, предохраняет от дальнейших процессов изменения положения зерен.

При повышенной нагрузке на балластный слой, как на скоростных линиях, так и на линиях с увеличенным осевым нагрузкам, повышается вероятность нарастания неравномерных осадок, что ведет к образованию люфтов под шпалами. Оседания и пластические деформации является следствием уплотнения, изменения положения зерен и повреждения частиц щебня. Через увеличен рост люфтов возникают повышенные расходы на текущее содержание и ухудшение комфорта движения, к которым предъявляются высокие требования [16].

## **2.2. Современные методы определения распространения волн удара в упругой среде, используемых в странах Европейского Союза**

При возбуждении колебаний в упругой среде источником, находящимся вблизи поверхности, образуются два основных вида волн – объемные и поверхностные. Объемные волны в упругих твердых средах распространяются в виде двух типов колебаний в зависимости от направления смещения частиц – продольные и поперечные. При прохождении продольной  $P$ -волны частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны, происходят деформации сжатия. При прохождении поперечной  $S$ -волны частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, тогда возникают деформации формы [21].

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		24

Поверхностные волны также разделяют в зависимости от плоскости колебания частиц на два типа – волны Лява и волны Рэлея. Волны Лява являются поляризованные волны, в которой частицы колеблются вдоль поверхности среды перпендикулярно направлению распространения волны. Эти волны возникают в слоистой среде в случае, когда скорость волны в нижнем слое ниже, чем в верхнем слое [21]. Волны Рэлея возникают вблизи свободной поверхности среды. Колебания частиц происходят в направлении распространения волны в плоскости, перпендикулярной поверхности [21]. Оба указанных типа волн имеют дисперсию, то есть зависимость фазовой скорости от частоты [2]. Глубина распространения колебаний поверхностной волны прямо пропорциональна длине волны (обратно пропорциональна частоте). Волна с высокой частотой колебаний быстро угасает и имеет небольшую глубину распространения, а уменьшение частоты позволяет увеличить глубину распространения [22].

Использование поверхностных волн Рэлея оказалось эффективным при волновом анализе зоны малых скоростей в верхней части геологического разреза. Основанные на их применении современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза (SASW и MASW) позволяют определить фазовые скорости спектральных компонент и построить вертикальный профиль скоростей поперечных волн.

### **2.3. Метод исследования распространения волн удара Spectral Analysis Surface Waves стран ЕС**

В последние годы в странах Европейского Союза активно применяется и развивается метод определения скоростей распространения поперечных волн, основанный на анализе дисперсионных характеристик поверхностных волн [23]. Данный метод был разработан в 1983 и получил название SASW (Spectral Analysis Surface Waves – спектральный анализ поверхностных волн).

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		25

К настоящему времени было разработано много вариантов метода SASW, различающихся типом волн исследуемых (основная гармоника волн Рэлея, высшие гармоники), режимом проведения наблюдений (активный, пассивный) и частотным диапазоном измерений. Решение поставленной задачи возможно при использовании метода Монте-Карло и статистического метода максимального правдоподобия. Существуют прямая и обратная (инверсия) задачи. Прямая – по данным профиля  $V_s$  строится кривая распределения, инверсия – обратное преобразование (рис. 2.1).

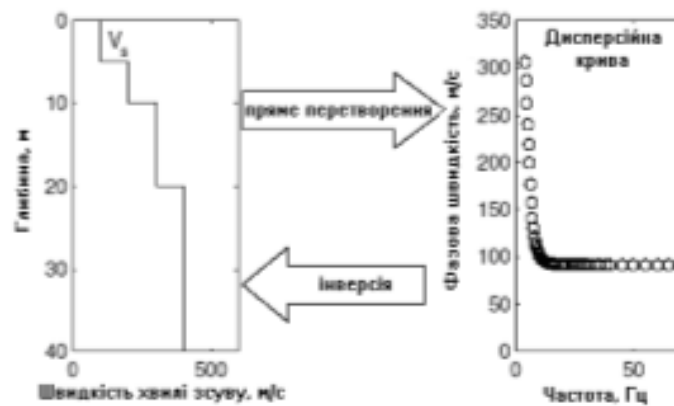


Рисунок 2.1 – Прямая и обратная задача метода SASW

Скорость поперечных волн тесно связана с деформационными характеристиками, такими как модуль упругости и модуль сдвига [21, 24]:

$$G = \rho c_s^2, \tag{1}$$

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

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3}$$

где  $c_s$  – скорость распространения поперечных волн S-волны;  $c_p$  – скорость распространения продольной волны P-волны;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность среды.

Приведенные зависимости позволяют на основе профиля поперечных скоростей получить начальный модуль сдвига и начальный модуль упругости и оценить качество уплотнения балластной призмы.

Процесс исследования распространения волн по методу SASW включает три этапа:

1. Проведение полевых измерений, позволяющие получить записи поверхностных волн с помощью специального оборудования (рис. 2.2);

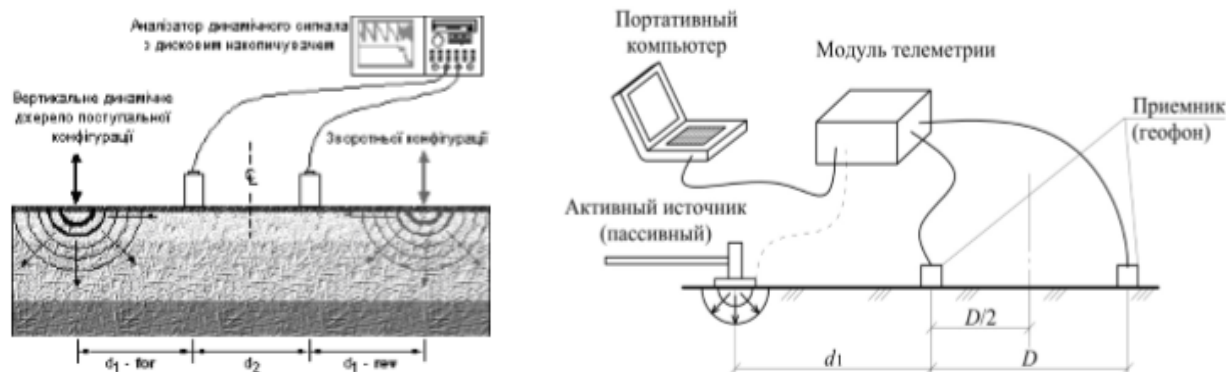


Рисунок 2.2 – Методика исследования параметров поверхностных волн методом SASW

2. Нахождение из полученных записей дисперсионных кривых (зависимости фазовой или групповой скорости от частоты)

3. Определение распределений скоростей поперечных волн в среде, имеют дисперсионные кривые, близкие к полученным по измерениям (восстановление разреза).

Для построения теоретической кривой дисперсии используются различные методы. Известно, что волна Рэлея имеет несколько форм распространения (гармоник) с различными значениями фазовых скоростей. Прогрессивные методы инверсии учитывают влияние высших гармоник волн Рэлея [25]. В некоторых случаях необходимо учитывать эффект объемных волн с применением методов спектрального анализа.

Метод спектрального анализа волновых полей представляется наиболее перспективным методом неразрушающего диагностики, несмотря на

достаточную информативность исследуемых параметров дорожной конструкции и возможности анализа напряженно-деформированного состояния конструкции под действием нагрузки от транспортных средств, движущихся.

#### **2.4. Метод многоканального анализа поверхностных волн Multichannel Analysis of Surface Waves стран ЕС**

Метод многоканального анализа поверхностных волн MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW) был впервые представлен в 1999 г. и опубликован в журнале Geophysics [25]. Проводится регистрация поверхностных колебаний волн Рэлея от различных источников, затем анализ этих скоростей и построение профиля скоростей поперечных волн. Переход от скоростей поперечных волн в начальных деформационных характеристиках осуществляется с помощью зависимостей (1) - (3). Многоканальный анализ поверхностных волн, как и спектральный анализ, проводится в три этапа:

- 1) сбор полевых данных;
- 2) дисперсионный анализ;
- 3) инверсия.

Для регистрации возникающих в почвах колебаний чаще всего используется 24-канальная система с низкочастотным геофоном (4,5 Гц), соединенных с телеметрической модулем. Полученные сейсмограммы передаются на портативный компьютер. Схема системы представлена на рис. 2.3. Сбор данных в полевых условиях осуществляется активным или пассивным методом (или их комбинированием) в зависимости от степени контроля выходных параметров. Такими параметрами являются: время возбуждения колебаний источником; расстояние между источником и приемной линией (первый геофон) - мощность возбуждения колебаний (частоты).

При наличии всех вышеперечисленных параметров и их полный контроль применяется активный метод анализа. Как источник обычно используется кувалда 8–10 кг (рис. 2.3). При ударе кувалдой о металлическую пластину

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		28

происходит возбуждение волн среды, колебания регистрируются вертикальными геофонами. В качестве источника могут применяться и другие приспособления.

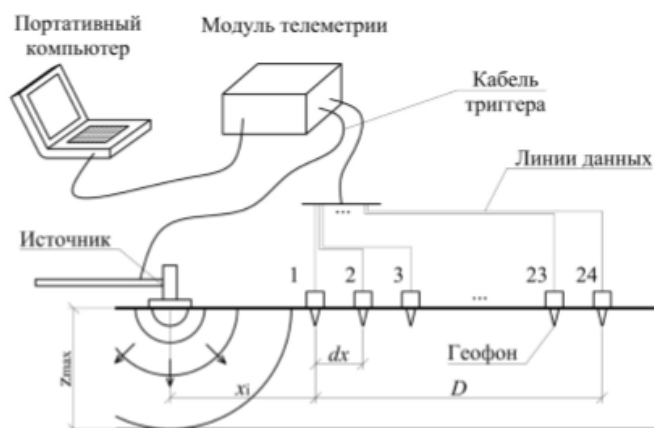


Рисунок 2.3 – Схема 24-канальной телеметрической системы при активном образе

Длина приемной линии [26] рассчитывается по формуле:

$$D = mZ_{max}, \quad (4)$$

где  $1 \leq m \leq 3$ , часто принимается равным 2, то есть  $D = \lambda_{max}$ ;  $Z$  – наибольшая глубина, на которой может быть восстановлена скорость поперечных волн,  $Z = 0,5\lambda_{max}$ ;  $\lambda_{max}$  – максимальная длина поверхностной волны. Расстояние от источника до первого приемника ( $x_1$ ) принимается от  $0,2D$  до  $D$ . Диапазон расстановки геофонов ( $dx$ ) берется в интервале от  $1dx$  к  $12dx$ . Обычно для 24-канальной системы он берется  $1dx$  и принимается равным минимальной длине волны  $\lambda_{min}$ . Тогда минимальная глубина исследования [26]

$$\lambda_{min} = Zk_{min}, \quad (5)$$

где  $0,3 \leq k \leq 1,0$ , часто принимается равным 0,5. Запись сигналов чаще всего производят в течение периода  $T = 1$  с при интервале дискретизации  $dt = 1$  мс. Можно увеличить время записи на несколько секунд при малых скоростях поперечных волн, однако не рекомендуется вести запись более 5 из-за повышения риска появления постороннего шума (например, от проезжающего автотранспорта) [27].

Заключительным этапом MASW есть инверсия дисперсионных кривых и построение профиля (1D, 2D, 3D) поперечных скоростей волн верхней части разреза (ВЧР). Поверхностная волна Рэлея есть функция частоты ( $f$ ), скоростей продольной ( $c_p$ ) и поперечной ( $c_s$ ) волн, плотности почвы ( $\rho$ ) и толщины слоя ( $h$ ) [22].

При этом для исследуемой толще грунта принимается послойная модель (см. рис. 2.3). Процедура инверсии заключается в подборе такой дисперсионной кривой теоретической модели почвы, которая максимально совпадает с измеренной кривой. Приближение осуществляется за счет изменения скоростей продольной и поперечной волн, плотности и мощности слоя. Существуют несколько методов инверсии: модель многочленов, метод Оккама [28], метод SQP и метод FSA [29]. Чаще всего применяется метод Оккама, основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения теоретической дисперсионной кривой от измеренной. Подробный процесс инверсии приведен в работе [30]. После того, как получена кривая, максимально совпадает с измеренной, проводится построение профиля поперечных скоростей. При наличии всех необходимых параметров можно получить деформационные характеристики грунта по вышеуказанным формулам (1) – (3).

## **2.5. Экспериментальные методы исследования осадка щебеночного балластного слоя при воздействии циклических нагрузок**

Исследование работы балластного слоя актуальны и в настоящее время, что подтверждается лабораторными исследованиями ВНИИЖТ в 2003 г. Деформативных свойств щебня [31–34], а также исследованиями, выполненными в Техническом Университете Дрезден и соответствующими публикациями в 2009-2010 гг. [35–36].

В ТУ Дрезден был выполнен лабораторные исследования работы балластного слоя под статическим и динамическим нагрузкам. Испытательный стенд состоял из двухслойного балластного слоя, на котором размещалась

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		30

железобетонная пившпала (рис. 2.4). Нагрузка на шпалу моделировалось таким образом, чтобы оно соответствовало действия рельсы на шпалу в пути.

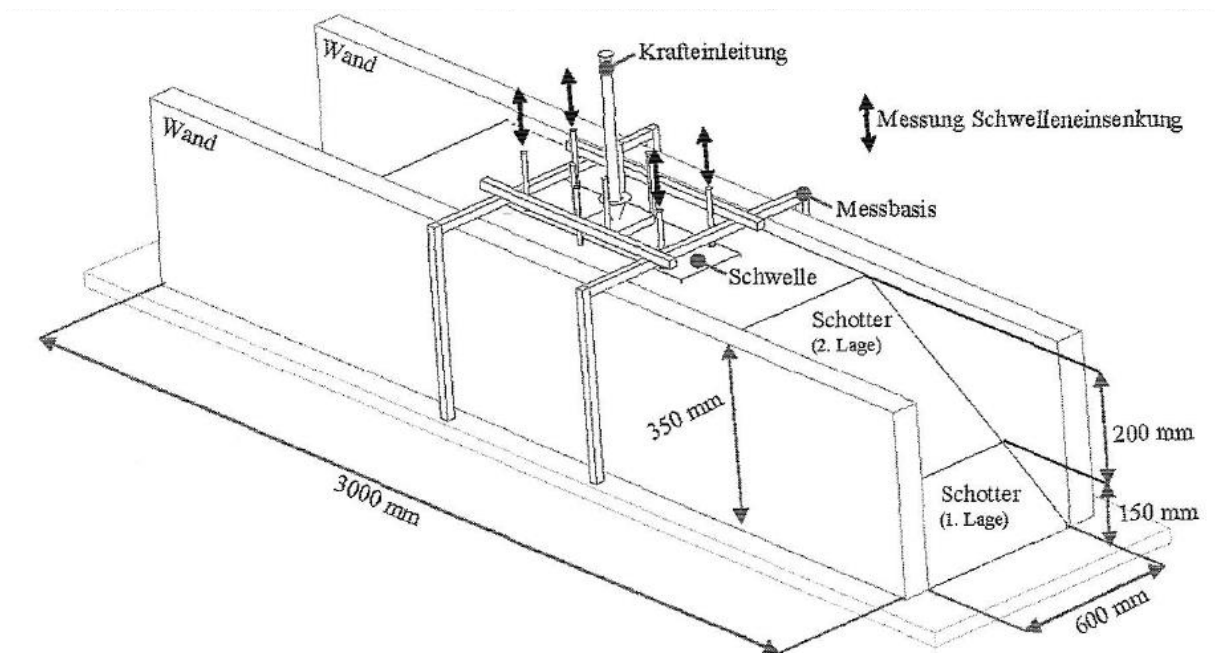


Рисунок 2.4 – Исследование осадки балластного слоя на испытательном стенде  
ТУ Дрезден [35]

В ходе эксперимента было исследовано влияние следующих факторов: материал балласта (песок, щебень и их комбинации), гранулометрический состав щебня (щебень мелкой фракции 5–45 мм и щебень крупной фракции 23–63 мм), послойное уплотнение, влияние динамической нагрузки. По результатам эксперимента анализировались взаимосвязи между данными факторами с осадкой и упругостью балластной призмы, распределением напряжений в основе балластной призмы и параметрами петли гистерезиса при различных циклах нагрузки [37]. Результаты эксперимента представлены в подразделе 1.3.

Авторы Eisenmann и Mattner [38, 39] исследовали повреждения балластного слоя, при котором навантажувался циклическим нагрузкам участок РШР с 4 шпалами на балластном слое толщиной 30 см и гравийным слоем, а также слоем для защиты земляного полотна, вся конструкция была установлена на жесткой бетонной основе. Значительное повреждение из-за стирания и слом зерен появилось только тогда, когда первоначальное уплотнение и большие

изменения положения частиц затухла. Больше повреждения находилось в толщине от 10 до 20 см, где теоретически возникают наибольшие сдвижные нагрузки. Дополнительное высокочастотное нагружение, должно отражать высокие скорости подвижного состава, вызвало усиленные осадки. Также о разрушении частиц балластного слоя при его подкладке путевыми машинами сказано в п. 1.6 и приложении Д.

Исследователь Hettler в 1984 году. [40] смоделировал в масштабе 1:3 проезд поезда с помощью 4 погрузочных цилиндров, на каждую вторую шпалу РШР с 8 шпалами при толщине балластного слоя 30 см и песка. Песок размещался до глубины 1,5 м под шпалой, а снизу находилась основа из крупного песка (рис. 2.5). При изменении нагрузки было установлено, что и у автора Klugar, что максимальная нагрузка приводит к максимальному росту осадок. На рис. 2.6 показано осадки РШР при различных осевых нагрузках. Результаты были аппроксимированы логарифмическим законом осадок. Также автором Hettler [40] было выполнено исследование неравномерности просадок, согласно которому относительное значение среднеквадратичного отклонения составляет 22% от абсолютного значения осадки. Кроме того, можно увидеть, что среднее отклонение в начальный период до стабилизации пути выше.

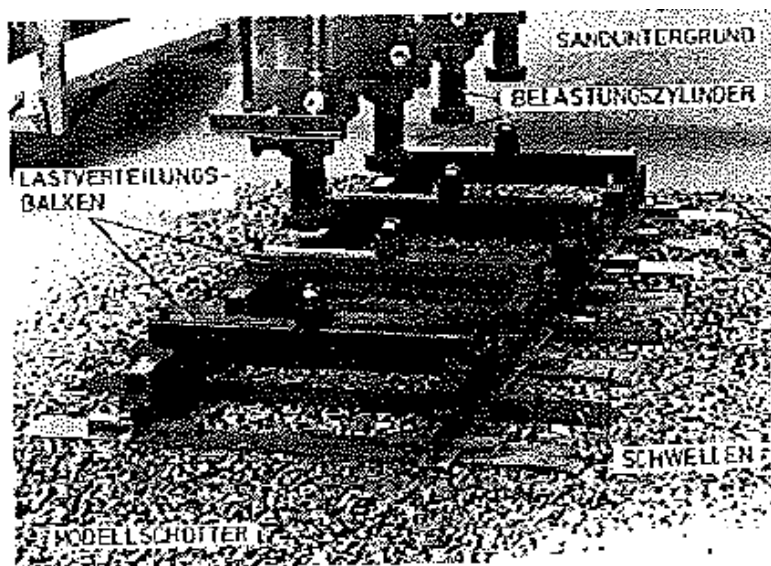


Рисунок 2.5 – Испытательный стенд Hettler [40]

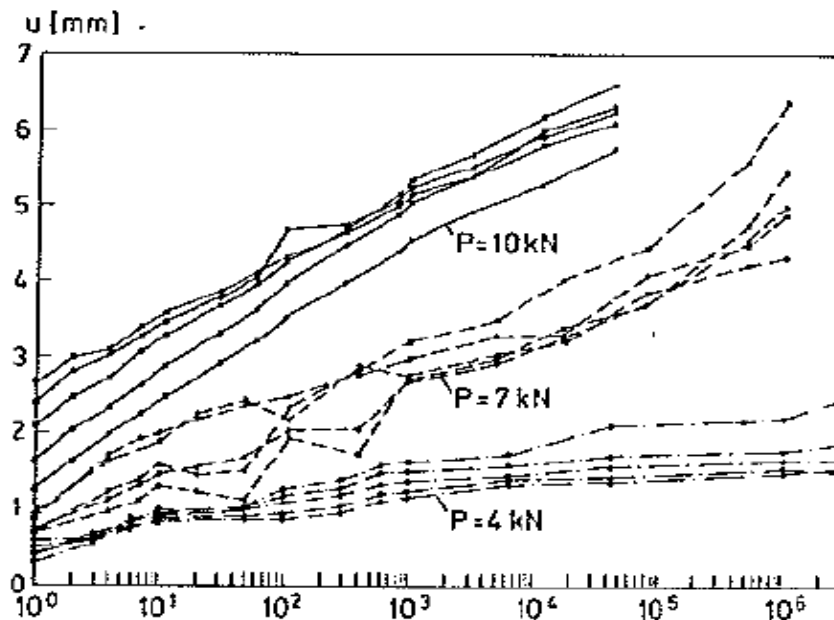


Рисунок 2.6 – Оседания РШР при различных осевых нагрузках [40]

Тем самым автором Hettler было определено связь между осадкой шпалы в балластном слое и деформациями по результатам трехосной испытаний балласта. Он провел статические и динамические триоснови испытания на специальном оборудовании для больших проб балласта (диаметр 78 см, высота 45 см). Исследована такие виды материала щебня, как базальт, диабаз, гранит и мелафир, преимущественно используются в сети Deutsche Bahn (далее – DB). При циклических испытаниях внутри каждого цикла увеличивалось вертикальное напряжение и уровень бокового давления с незначительной скоростью нагрузки (квазистатических), и после этого балласт снова разгружался в исходное состояние. Предельное состояние было достигнуто после 100 циклов.

Также исследователями Ваеßler и Rucker [38] было выполнено экспериментальные исследования на относительно большом испытательном стенде, изображен на рис. 2.7. Испытательный стенд состоял из бетонного лотка, заполненного грунтом, уплотненным послойно подбивочный плитой. На защитный слой земляного полотна (далее – PSS) была устроена балластная путь с 4 шпалами. Рейса была разрезана посередине, чтобы избежать нежелательных

люфтов под недвижимым нагрузочным устройством. Измерительные устройства включали сенсоры для перемещений, скорости и ускорения на шпалах, месдоза и акселерометры в балласте и защитном слое, а также боковые перемещения откосов балластной призмы.

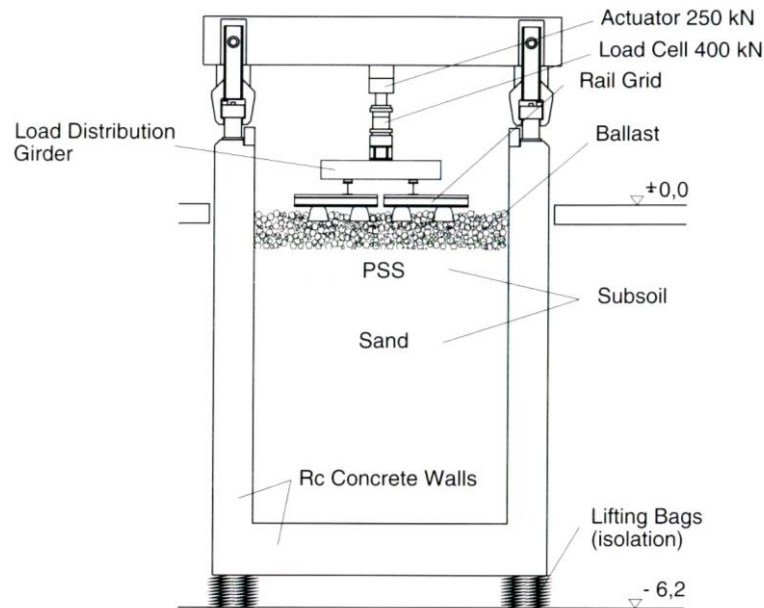


Рисунок 2.7 – Геотехнический испытательный стенд  
авторов Ваеßler та Rucker [38]

На рис. 2.8 показан пример проведенных испытаний. Относительно небольшое увеличение остаточных деформаций наблюдается после первых циклов (после стабилизации). Выполнено 500000 циклов циклической нагрузки между -10 и -240 кН при частоте 1,5 Гц. Кривая осадок может хорошо описываться логарифмической функцией. Рисунок справа показывает оседания после воздействия ударной нагрузки. Прикладывалось несколько ударных нагрузок, а затем несколько циклических. Амплитуды циклических нагрузок были одинаковыми, что и на протяжении первых 500 000 циклов. На горизонтальной оси показано количество таких чередувань. 500 чередувань означают только несколько тысяч дополнительных циклов. Можно наблюдать больший рост деформаций, чем раньше. Это вызвано ударным нагрузкам.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		34



динамические нагрузки. Таким образом в механизме расстройство геометрии пути влияние люфта нельзя считать однозначным, поэтому с практической целью выполняются натурные исследования расстройство пути.

Учитывая характер действия подвижного состава железнодорожного транспорта на железнодорожный путь актуальным вопросом является исследование процессов в виде распространения колебаний в ее элементах и влияние данных процессов на долговечность материалов верхнего и нижнего строений железнодорожных путей. Процесс распространения колебаний при воздействии подвижного состава в элементах пути зависит от физико-механических характеристик элементов пути и отражением их фактического технического состояния.

Наиболее быстрый выход и разрушения имеет балластный слой, который кроме этого влияет на расстройство геометрии железнодорожного пути в виде накопления вертикальных и горизонтальных неровностей на пути. А это в свою очередь влияет на дальнейшее срок службы элементов пути и преждевременного их выхода из эксплуатации. Поэтому вопрос мониторинга и контроля качественного уплотнения балластного слоя является актуальным и требует разработки экспериментальной и теоретической методик оценки степени уплотнения балластного слоя в течение жизненного цикла балласта железнодорожного пути.

## Выводы в раздел 2

Из проведенного анализа современных европейских методов определения степени уплотнения почвенной среды установлено следующее:

1. Методы SASW и MASW является неразрушающими методами, существенно сокращает трудозатраты и стоимость проведения исследования качества уплотнения щебеночного балласта.
2. Европейские методы SASW и MASW являются перспективными методами для контроля качества уплотнения баласного слоя железнодорожного

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		36

пути при выполнении ремонтно-восстановительных работ на железнодорожном пути.

3. Знание механизмов разрушения и эксплуатационных факторов влияния на работу балластного слоя может дать ответ, по прогнозированию расстройство балластного слоя и связанного с этим планированием путевых работ, оптимизации его работы, выбора комбинации параметров конструкции, лучше всего соответствуют заданным эксплуатационным условиям. Все это может значительно уменьшить затраты на сооружение и эксплуатацию железнодорожного пути.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		37



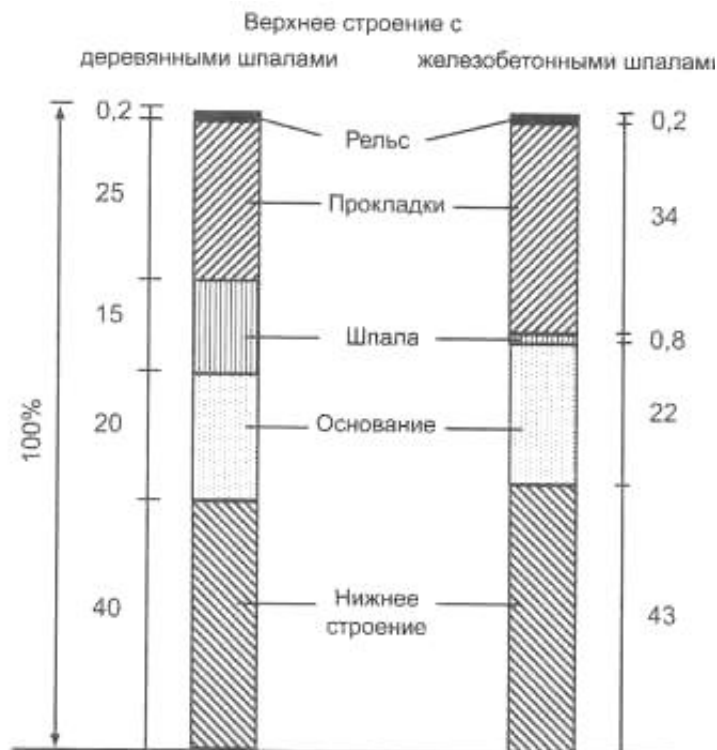


Рисунок 3.2 – Средние процентные составляющие несущих элементов пути в общей упругости пути

Как видно из рис. 3.2 балластный слой составляет 20% в формировании несущей способности железнодорожного пути. Поэтому для стабильной работы пути необходимо обеспечить достаточную плотность балласта пути. Для этого в работе предложена методика определения плотности балласта пути с помощью использования высокочастотных инерционных датчиков ускорений.

### 3.2. Описание устройства для исследования степени уплотнения балластного слоя железнодорожного пути

В данной работе использованы способ определения качества уплотнения балластного слоя железнодорожного пути, который заключается в ударно-импульсном методе и кинематической и динамической интерпретации импульсного отклика.

Для измерений уплотнения балластного слоя железнодорожного пути использовано устройство измерения уплотнения балласта, который разработан в работе [43, 44] и структурная схема которого приведена на рис. 3.3.

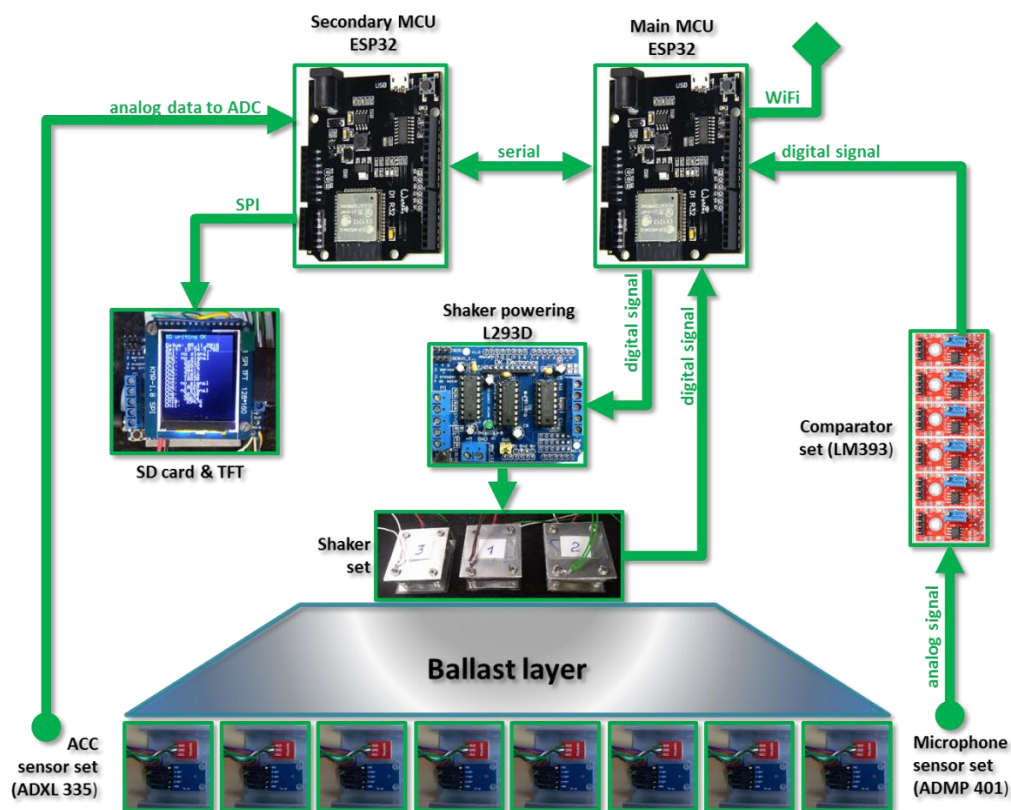


Рисунок 3.3 – Структурная схема устройства проведения измерений уплотнения щебеночного балластного слоя железнодорожного пути [43, 44]

Устройство состоит из персонального компьютера, двух программируемых микроконтроллеров типа ESP-32, трех шейкеров для задания импульса, которыми руководит Motor Shield и датчиков регистрации волны удара, которая проходит через балласт. В качестве датчиков использованы микрофоны звука MEMS типа ADMP 401 и датчики ускорений.

### 3.3. Экспериментальные исследования степени уплотнения щебеночного балласта в лабораторных условиях

Для сравнения времени распространения упругой волны удара в зависимости от степени уплотнения щебеночного балласта были проведены лабораторные исследования по измерению времени распространения волны через щебень в трех циклах эксперимента.

### 3.3.1. Программа экспериментальных исследований уплотнения щебеночного балласта

В первом эксперименте щебеночный балласт был максимально разуплотненного (насыпная плотность балласта), во втором лабораторном эксперименте щебеночный балласт должен промежуточное уплотнение, которое выполнялось с работодателем гидропульсу и в третьем лабораторном эксперименте щебеночный балласт был максимально уплотненный гидропульсом при воздействии циклической нагрузки с частотой 40 Гц и амплитудой 10 кН.

Время распространения упругих волн ударов определяется разницей времени с момента (времени) задания импульса центральным шейкером Ш2 и время прихода упругой волны удара к микрофонам М1-М4 и акселерометров А1-А6. Схема размещения датчиков ускорений и микрофонов в подошве щебеночной балластной призмы приведена на рис. 3.4.

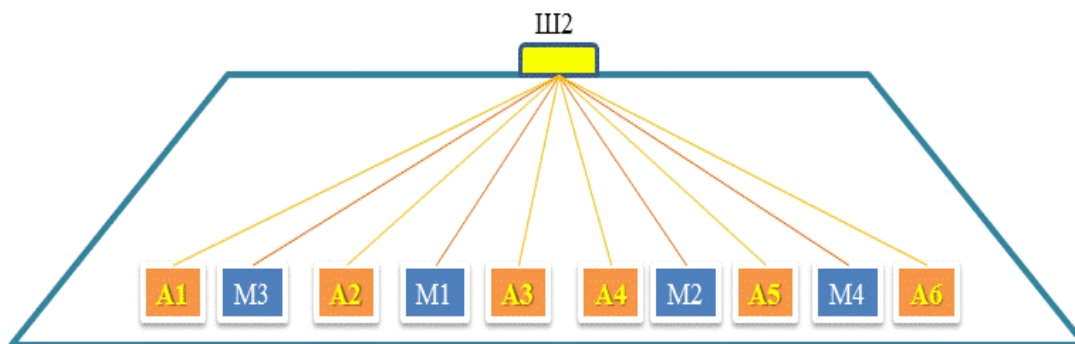


Рисунок 3.4 – Схема для определения времени распространения волн ударов от центрального шейкера Ш2 к датчикам

### 3.3.2. Результаты определения времени и ускорений в балластной призме

Результаты исследования времени распространения волн удара от центрального шейкера №2 при неуплотненном балласте, приведены на рис. 3.5.

С рис. 3.5 видно, что время распространения волн удара в центральные датчиков, которые размещены ближе к шейкера №2 (источники импульса)

составляет 1131 мс до MEMS 1 и 1073 мс до MEMS 2. В крайних датчиков MEMS 3 – 1437 мс и к MEMS 4 – 1447 мс.

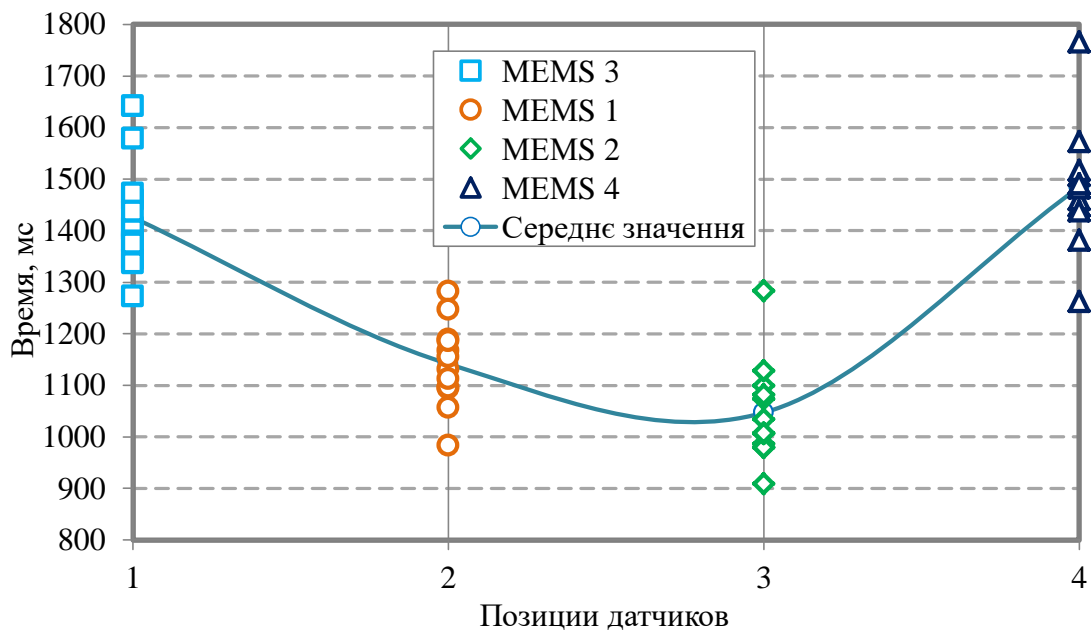


Рисунок 3.5 – Время распространения волн удара при неуплотненном щебня при задании импульса от центрального шейкера №2

На рис. 3.6 приведены зарегистрированы вертикальные волны удара, изготовленные из акселерометров, которые расположены на разных расстояниях от импульсного источника возмущения (шейкера 2). В данном исследовании балласт разуплотненного.

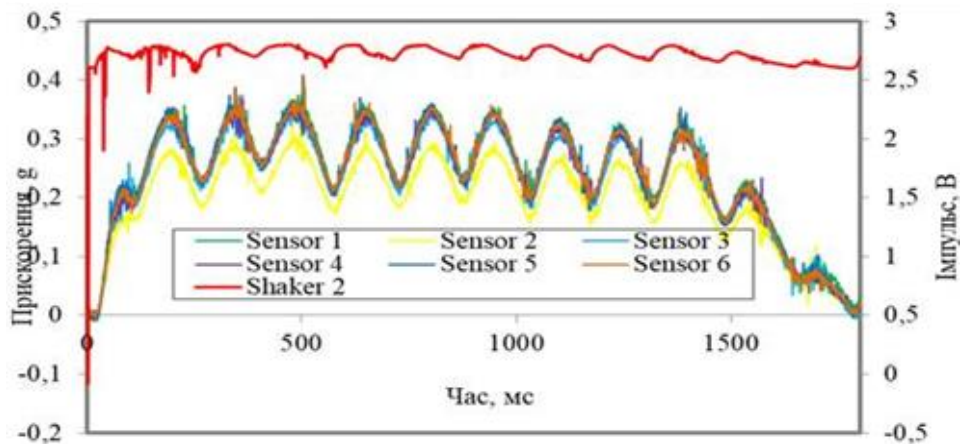


Рисунок 3.6 – Распространение вертикальных волн удар по оси z при разуплотненном балласте

С рис. 3.6 можно увидеть, что максимальная амплитуда вертикальных ускорений составляет 0,37 g.

На рис. 3.7 приведены измеренные поперечные волны удара, изготовленные из акселерометров, которые расположены на разных расстояниях от импульсного источника возмущения (шейкер 2, балласт разуплотненного). В данном исследованию балласт разуплотненного.

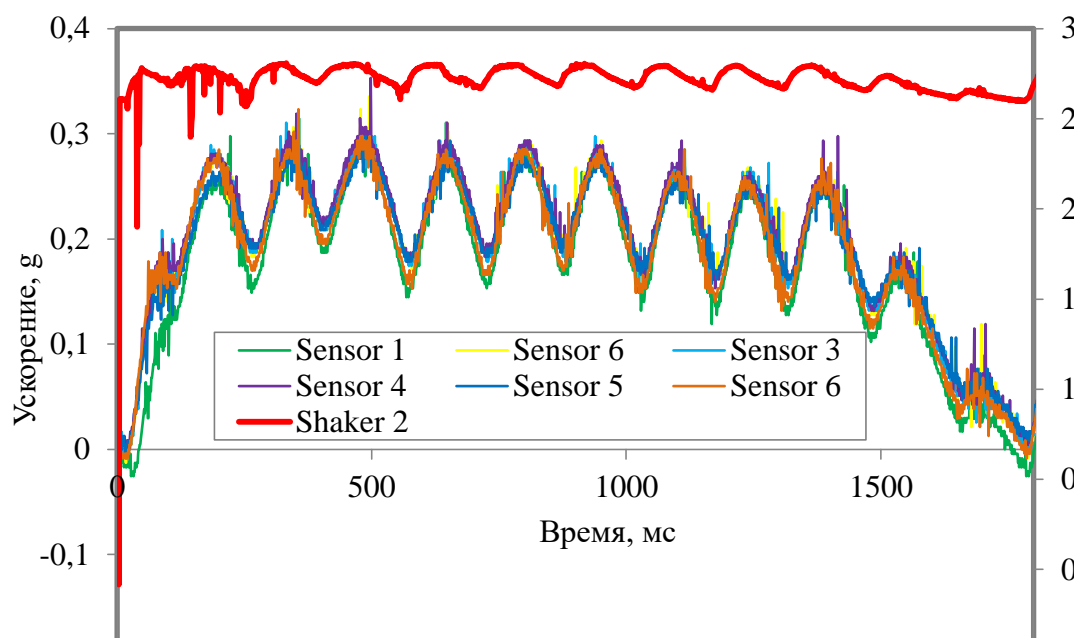


Рисунок 3.7 – Распространения поперечных волн удар по оси Oz при разуплотненном балласте

Как видно из рис. 3.7 максимальная амплитуда поперечного ускорения составляет 0,3 g.

Отношение амплитуды поперечных волн в вертикальных при разуплотненного балласте составляет 0,81. И так, амплитуда ускорений поперечной волны меньше за вертикальную волну до 19%.

Далее была разработана программа исследований времени распространения волн удара в щебня в зависимости от его уплотнения. Уплотнение щебеночного балласта осуществлялось гидропульсом с программированием амплитудно-частотных нагрузок, способствовали увеличению плотности балластного слоя. При этом нагрузка прикладывалась на двутавровую балку, помещенную в ящик

с щебеночным балластом, занимавшая весь периметр балластной призмы (рис.3.8).



Рисунок 3.8 – Процесс уплотнения балласта гидропульсом

Программа задания промежуточного уплотнения щебеночного балласта в лабораторных условиях предусматривала в задания плавного изменения нагрузок от гидропульсу от 0 кН до 5 кН и дальше задания знакопеременного нагрузки амплитудой +9.5 кН до -0.5 кН и частотой 1 Гц (рис. 3.9).

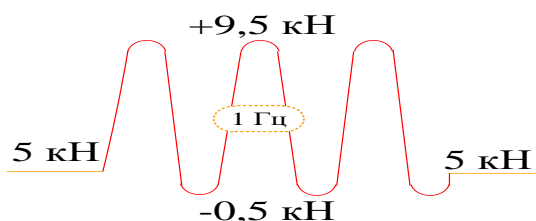


Рисунок 3.9 – График задания нагрузок гидропульсом на щебеночный балласт при промежуточном степени уплотнения балласта

Для максимального уплотнения щебеночного балласта предполагалось задания статической нагрузки величия 5 кН, дальше было запрограммировано динамическую нагрузку с амплитудой от -4,5 кН до +4,5 кН при частоте 40 Гц (рис. 3.10).

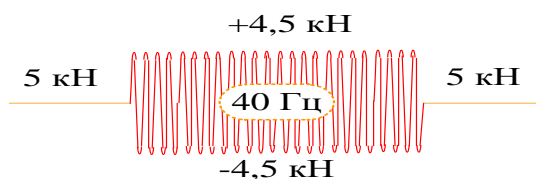


Рисунок 3.10 – График задания циклической нагрузки на щебеночный балласт при максимальном степени уплотнения балласта

Процесс исследования плотности балласта при промежуточном уплотнении щебеночного балласта предусматривал выполнение эксперименту путем размещения в ряд трех шейкеры, которые поочередно задавали 12 раз импульс и с помощью микрофонов ADMP 401 фиксировалось время прохождения волны при каждом ударе шейкера.

Промежуточное уплотнения балласта проводилось согласно задания нагрузок, приведены на рис. 3.9. А именно в эксперименте задавалась плавное изменение нагрузки от 0 кН до 5 кН и дальше знакопеременных динамическая нагрузка амплитудой от +9.5 кН до -0.5 кН и частотой 1 Гц.

На рис. 3.11 приведены прохождения волн удара при задании импульса от шейкера №2, который расположен по центру балластной призмы.

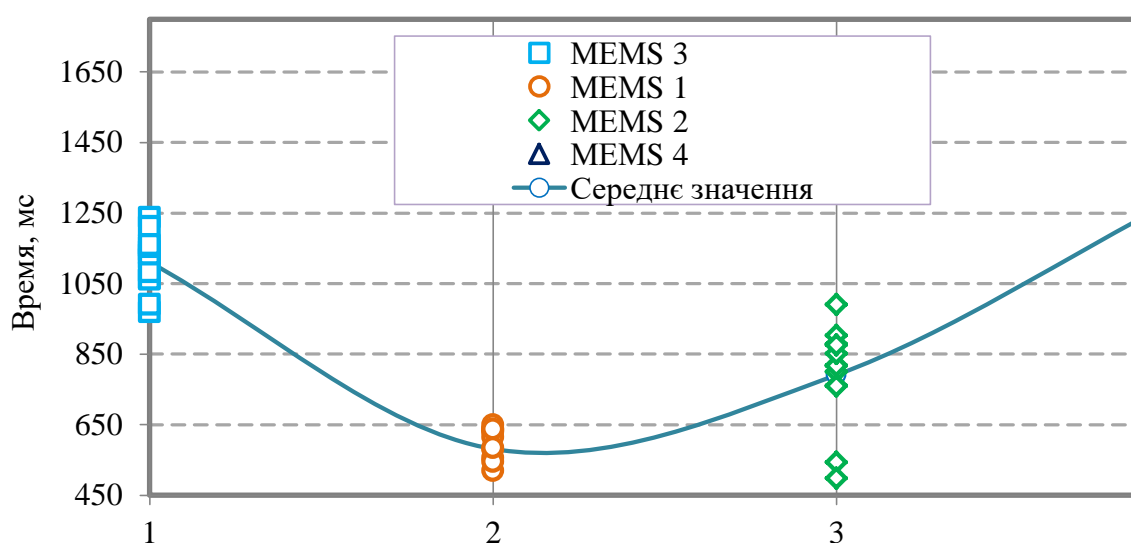


Рисунок 3.11 – Время распространения волн удара при промежуточном уплотнению щебня и задании импульса от шейкера №2

С рис. 3.11 видно, что время распространения волн удара в центральные датчиков, которые размещены ближе к шейкера №2 (источники импульса) составляет 581 мс до MEMS 2 и 800 мс до MEMS 3. В крайних датчиков MEMS 1 – 1083 мс, а к MEMS 4 – 1272 мс.

На рис. 3.12 приведены измеренные вертикальных волн удара, изготовленные из акселерометров, которые расположены на разных расстояниях от импульсного источника возмущения (шейкера 2).

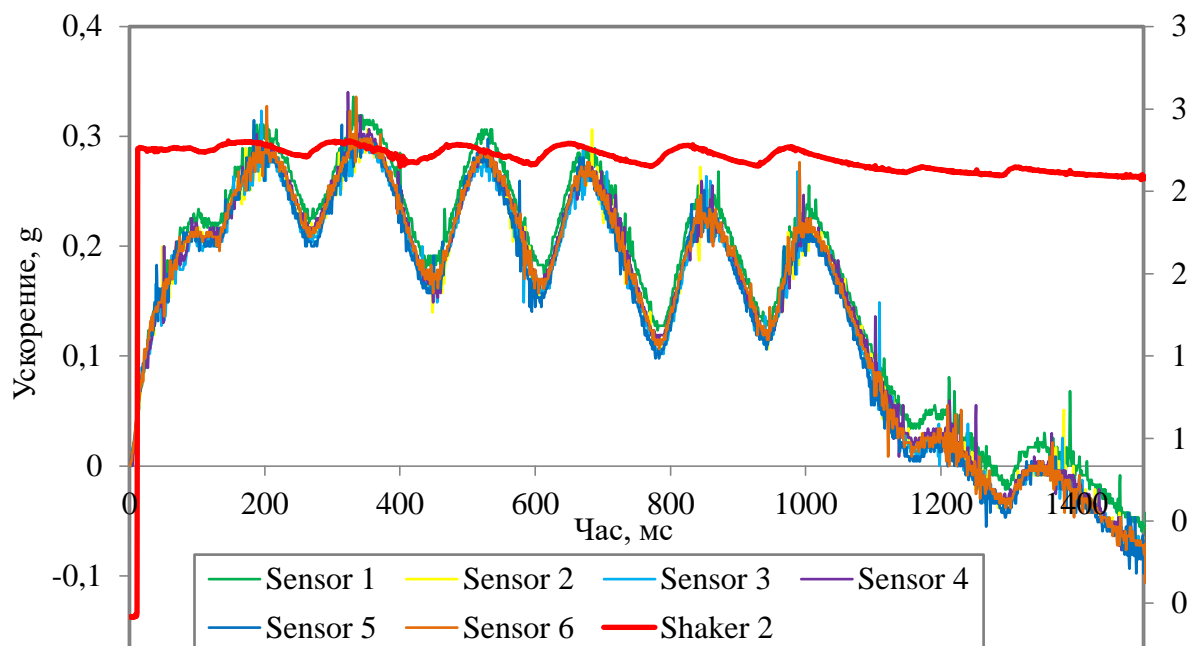


Рисунок 3.12 – Распространение вертикальных волн удар по оси Oz при промежуточном уплотнении балласта

С рис. 3.12 можно увидеть, что максимальная амплитуда вертикальных ускорений составляет 0,3 g.

Окончательное уплотнение балластного слоя выполнялось по программе экспериментальных исследований, приведена на рис. 3.10. Согласно данной программы исследований прикладывалась статическая нагрузка величиной 5 кН, дальше было запрограммировано знакопеременную динамическую нагрузку с амплитудой от -4,5 кН до +4,5 кН и частотой 40 Гц.

На рис. 3.13 приведены прохождения волн удара при задании импульса от шейкера №2, который расположен по центру балластной призмы.

Из проведенных экспериментальных исследований видно (рис. 3.13), что время распространения волн удара в центральные датчиков, которые размещены ближе к шейкера №2 (источники импульса) составляет 252 мс до MEMS 1 и 223 мс до MEMS 2. В крайних датчиков MEMS 3 – 867 мс, а к MEMS 4 – 718 мс.

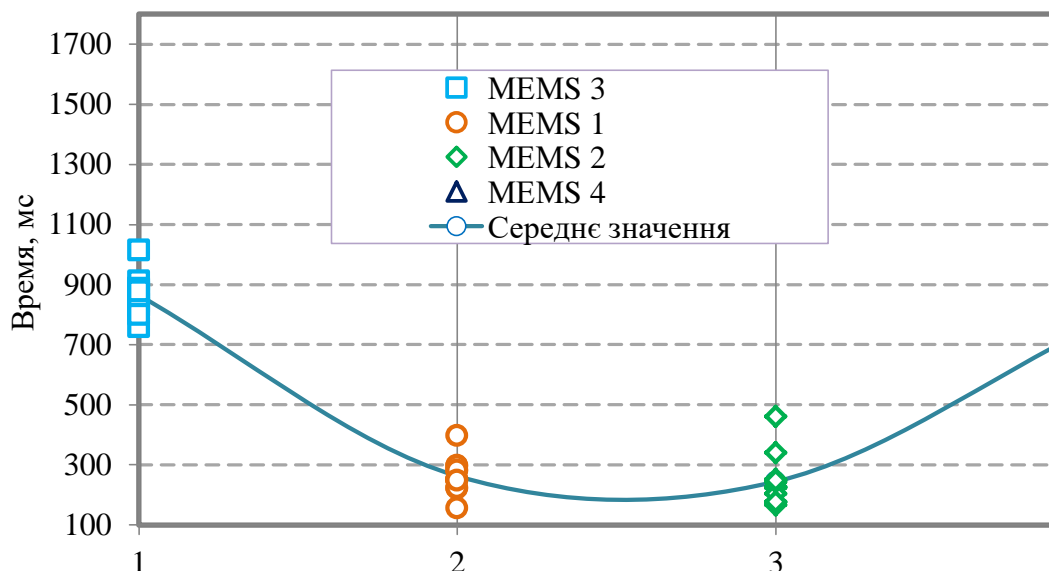


Рисунок 3.13 – Время распространения волн удара при максимально уплотненном щебня при задании импульса от шейкера №2

На рис. 3.14 приведены измеренные вертикальные волны удара, изготовленные из акселерометров, которые расположены на разных расстояниях от импульсного источника возмущения (шейкер 2).

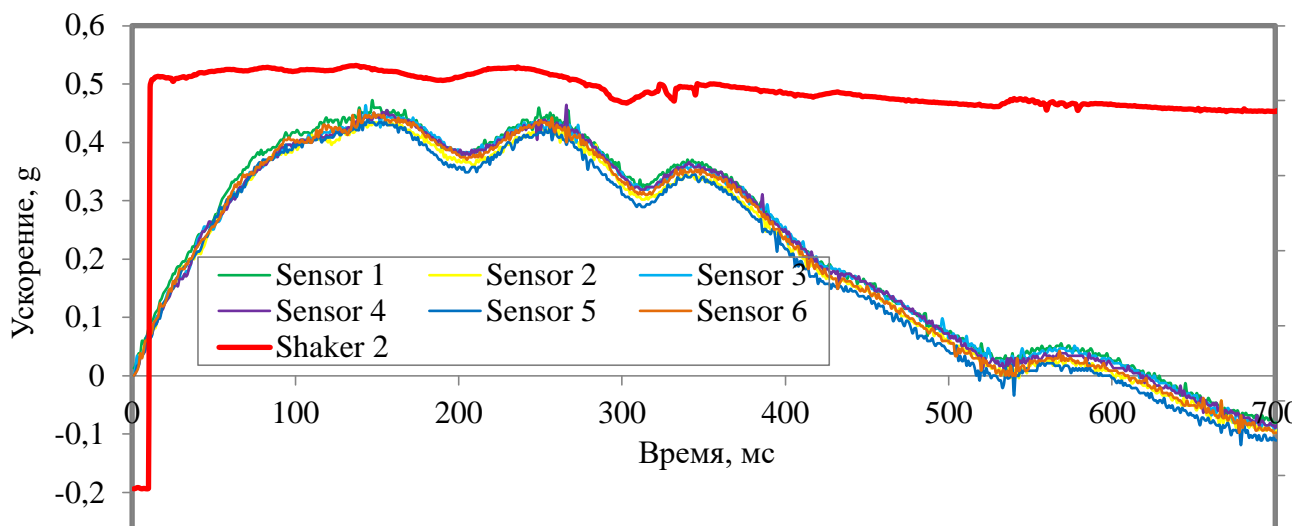


Рисунок 3.14 – Распространение вертикальных волн удар по оси Oz при максимальном уплотнении балласта

С рис. 3.14 можно увидеть, что максимальная амплитуда вертикальных ускорений составляет 0,44 g.

### 3.4. Результаты исследования времени распространения упругих волн удара в зависимости от степени уплотнения щебеночного балласта

Приведем сравнения времени и скорости распространения волн удара при трех состояниях исследование уплотнения балласта: разуплотненного балласт, промежуточное состояние уплотнения и максимально уплотненный балласт.

Результаты сравнения времени прохождения волн ударов при задании импульса от центрально расположенного шейкера №2, приведены на рис. 3.15.

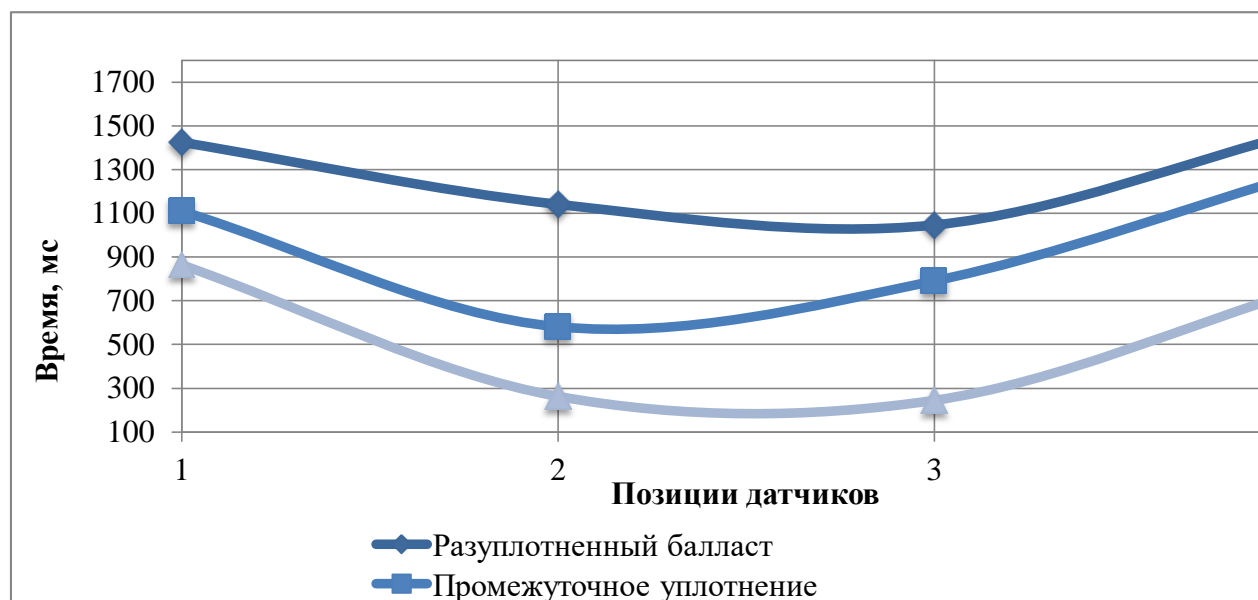


Рисунок 3.15 – Сравнение времени прохождения волн удара при различных степенях уплотнения балластного слоя

Проанализируем время прохождения волны через щебеночный балласт при различных степенях уплотнения и расположении датчика максимально близко к источнику импульса. На рис. 3.15 это позиция датчика №2 и №3. И так, при разуплотненном щебеночном балласте время прохождения волны через зернистое среду составляет 1141 мс, при промежуточном уплотнении балласта – 581.1 мс и при максимально уплотненном балласта по программе экспериментального уплотнения №10, время распространения волны составляет – 262 мс.

Уменьшение времени прохождения волны через щебеночный балласт к датчику при максимально уплотненном балласте к разуплотненного составляет 4,5 раза.

Итак, с увеличением уплотнения щебенного балласта время прохождения волны уменьшается. Поэтому по времени распространения волны удара от источника импульса к принимающему датчику можно проводить оценку степени уплотнения балласта железнодорожного пути.

### Выводы к разделу 3

В результате проведенных лабораторных экспериментальных исследований по определению степени уплотнения щебеночного балласта установлено следующее:

1. В результате лабораторных измерений уплотнения щебеночного балластного слоя установлено, что в недостаточно уплотненном щебеночном балласте сигнал значительно теряет мощность, что видно из времени прохождения волны до крайних датчиков, которые находятся ближе к свободному концу балластного плеча.

2. При увеличении уплотнения щебеночного балласта время прохождения волны уменьшается. Поэтому по времени распространения волны удара от источника импульса к принимающему датчику можно проводить оценку степени уплотнения балласта железнодорожного пути.

3. Лабораторные измерения времени распространения упругих волн удара при разуплотненном щебеночном балласте показали, что время прохождения волны через зернистую среду составляет 1141 мс, при промежуточном уплотнении щебеночного балласта – 581.1 мс и при максимально уплотненном щебеночном балласте, время распространения упругой волны составляет – 262мс.

4. Уменьшение времени прохождения упругой волны через щебеночный балласт при максимально уплотненном балласте к разуплотненного составляет 4,5 раза. Поэтому по времени распространения упругой волны можно принимать решение о степени уплотнения щебеночного балласта железнодорожного пути.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		49

**РАЗДЕЛ 4**  
**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ**  
**ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО**  
**ПУТИ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЕГО ПЛОТНОСТИ**

**4.1. Анализ недостатков существующих методов оценки работы балластного слоя железнодорожного пути**

Сегодня нормативными документами на железных дорогах Украины при проектировании конструкций пути используют критерий допустимых напряжений, возникающих в балластном слое пути.

Следует отметить, что напряжение в балсте могут иметь различные расчетные значения в зависимости от грузонапряженности и типа подвижного состава [45, 46, 47].

Однако, подход основан на критерию допустимых напряжений в балластном слое становится все более неприемлемым. Из-за отсутствие четких границ трудоспособного и нетрудоспособного состояния балластного слоя железнодорожного пути по критерию измерения напряжений. Это следует из исследований ученых, отмечают, что в течение срока службы балластного слоя происходит непрерывное изменение напряженного состояния балласта железнодорожного пути.

Другой причиной является неучет фактора текущего содержания пути в процессе ее эксплуатации, который является определяющим для сроков службы балластного слоя. Кроме того, существует ряд других факторов, без исследования которых невозможно достоверно провести оценку работы балластного слоя, скажем, динамическое взаимодействие подвижного состава и пути.

Выделим следующие недостатки оценки работы балластного слоя железнодорожного пути:

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		50

-расчетные напряжения, возникающие в балластном слое и земляном полотне приближаются к допустимым напряжениям. Однако в другие элементы пути имеют значительный запас прочности по допустимым напряжениями, что приводит к неопределенности, как будет с состоянием балластного слоя и земляного полотна, если у них будут возникать напряжения выше допустимых;

-балластный слой железнодорожного пути при снижении работоспособности приводит к расстройству геометрии железнодорожного пути, требует постоянного контроля его осадки;

-значный влияние на качественную работу щебеночного балластного слоя железнодорожного пути играет комплекс работ, выполняемых на пути (средний ремонт, капитальный ремонт, модернизация);

-допустимыми напряжения, возникающие в балластном слое не зависящих от работ по текущему содержанию и интенсивности эксплуатации железнодорожного пути;

-довговичная работа щебеночного балласта пути зависит от уровня вибрационного воздействия при воздействии подвижного состава железных дорог;

-неровность, которая возникает на пути, имеет обратное влияние на расстройство балластного слоя и пути в целом;

-механизм разрушения балластного слоя происходит постепенно и это связано с жесткостью пути, нагрузками на балласт при динамическом воздействии подвижного состава.

Следует отметить, что кроме допустимых напряжений важным фактором работы железнодорожного пути на балласте является исходное качество уплотнения балласта пути. Поэтому при выполнении ремонтно-путевых работ рекомендуется определять степень уплотнения балласта железнодорожного пути.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		51

## **4.2. Рекомендации по определению уплотнения щебеночного балласта железнодорожного пути**

Знание механизмов разрушения и воздействия различных факторов на работу балластного слоя железнодорожного пути позволит прогнозировать расстройство балластного слоя и связанного с этим расстройством геометрии пути от чего будет и зависеть планированием ремонтно-путевых работ, улучшения его работы, выбора параметров конструкции, которые отвечают заданным эксплуатационным условиям. Указанные факторы могут значительно уменьшить расходы путевого хозяйства на строительство и эксплуатацию железнодорожного пути.

При выполнении ремонтов пути на железных дорогах Украины используется технология стабилизации балластного слоя после полного балластирования и отделки балластной призмы с использованием динамических стабилизаторов. Эффективная стабилизация щебеночного балласта происходит не глубже, чем 15-20 см под шпалой. Поэтому при такой технологии могут оставаться участки с возможным интенсивным ростом начальных неровностей по разным причинам, такие как: разная толщина отсыпки и балластирования, режим работы динамического стабилизатора, его скорость. Поэтому может потребоваться дополнительный рабочий проезд стабилизатора.

Учитывая, то что работа динамического стабилизатора по сравнению с другими машинами является достаточно дорогой поэтому более эффективным потенциалом улучшения работы щебеночного балластного слоя является установление степени его уплотнения после выполнения ремонтно-путевых работ при укладке пути или ее подкладке. Поскольку достижения нормативного степени уплотнения щебеночного балластного слоя приведет к обеспечению долговечности и безотказной работы железнодорожного пути.

Степень уплотнения балластного слоя пути рекомендуется определять путем регистрации и последующего анализа параметров волновых процессов, возникающих в балластном слое железнодорожного пути. Это даст

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		52

эффективную оценку фактического состояния уплотнения щебеночного балласта и кроме этого позволит оценить несущую способность балласта и механизм прогнозирования дальнейшего расстройство геометрии пути в зависимости от уплотнения балласта.

Таким образом, установление зависимости между временем распространения волны при различных уплотнениях балластного слоя и гранулометрического состава позволит анализировать качество уплотнения балласта, как в процессе эксплуатации так и после выполнения выправочно-подбивочно работ на железнодорожном пути. Для регистрации параметров волны сдвига могут быть использованы поверхностные волны Рэлея и Лява.

#### **4.3. Рекомендации по повышению срока службы балластного слоя железнодорожного пути**

Остаточные деформации балластного слоя происходят из-за постепенного уплотнения за счет переупаковки зерен щебеночного балластного слоя при воздействии вибраций от путевых машин (ВПО, ВПР) и нагрузок от подвижного состава железнодорожного транспорта.

Одним из методов повышения несущей способности щебеночного балласта железнодорожного пути является увеличение крупности зерен щебня благодаря чему увеличивается несущая способность балласта, увеличивается площадь передачи давления на земляное полотно.

Следующим методом увеличения срока службы балласта является нормативное содержание геометрия пути в плане и профиле. Поскольку вертикальные неровности на пути вызывают дополнительные силы от подвижного состава железнодорожного транспорта, приводят к увеличению нагрузок на балластный слой пути.

Согласно работе [47] начальная качество и интенсивность расстройство геометрии пути являются важнейшими показателями качества балластной пути.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		53

Состояние пути можно объективно оценить с помощью измерений различных величин. Одной из наиболее подходящих величин для описания качества геометрии пути являются среднее отклонение вертикальной геометрии на определенной длине участка.

Другие дополнительные показатели качества геометрии пути состоят из вертикальной неровности, неровности в плане, повышении и других геометрических показателей, таких, как площадь отклонения, которая измеряется измерительным вагоном EM 120 (Plasser & Theurer).

При определении качества колеи в странах Европейского Союза применяются следующие методики контроля:

- степени качества CEN [11]: значение превышения предельных измеренных параметров на пути группируются по классам;
- на немецких железных дорогах используются и параметры оценки качества пути [11]: среднеквадратичные отклонения параметров положения пути в плане и профиле, которые скупают к определенному индексу качества;
- измерение реакции подвижного состава при прохождении определенного участка пути [11]: величинами для оценки при этом является ускорение в подвижном составе и изменения ускорений, например, на австрийских железных дорогах показатель качества MDZ-а.

Повреждение балластного слоя вызывает появление остаточных деформаций, которая возникает в результате перераспределения частиц щебня, износа частиц при многократном нагрузке, загрязнении и влияния других факторов.

Согласно анализу средних годовых расходов жизненного цикла пути в зависимости от грузонапряженности, можно увидеть, что они состоят из трех основных составляющих: расходы на амортизацию, на помехи движению поездов и текущее содержание [11].

Для экономии расходов на содержание и ремонт пути в процессе эксплуатации рекомендуется после среднего, капитального ремонтов и

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		54

модернизации проводить измерения степень уплотнения балластного слоя с помощью измерения времени прохождения волны удара через балластную призму и сравнивать его с допустимыми параметрами времени прохождения волны удара.

#### **Выводы к разделу 4**

Из приведенных рекомендаций можно сделать следующие выводы:

1. На увеличение срока службы балласта железнодорожного пути влияет начальный степень уплотнения балластного слоя, который можно определить с помощью измерения времени прохождения волны удара через балластную призму посл подбивке балласта машинами ВПО, ВПР.

2. Для контроля степени уплотнения щебеночного балласта железнодорожного пути рекомендуется использовать неразрушающие методы, которые позволяют определить время распространения упругой волны удара в зависимости от степени уплотнения балласта.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		55

## ВЫВОДЫ

Основные научные результаты и выводы магистерской работы заключаются в следующем:

1. Наиболее распространенной конструкцией пути является путь на щебеночном балласте, как в Украине так и в странах Европейского Союза. Для стабильной и долговечной работы железнодорожного пути на балласте необходимо обеспечить нормативный степень уплотнения щебеночного балласта при строительстве железнодорожного пути.

2. Знание механизмов разрушения и эксплуатационных факторов влияния на работу балластного слоя может дать ответ, по прогнозированию расстройтва балластного слоя и связанного с этим планированием путевых работ, оптимизации работы, выбора комбинации параметров конструкции, лучше всего соответствуют заданным эксплуатационным условиям. Все это может значительно уменьшить затраты на сооружение и эксплуатацию железнодорожного пути.

3. В результате лабораторных измерений уплотнения щебеночного балластного слоя установлено, что в недостаточно уплотненном щебеночном балласте сигнал значительно теряет мощность, что видно из времени прохождения волны до крайних датчиков, которые находятся ближе к свободному концу балластного плеча. Лабораторные измерения времени распространения упругих волн удара при разуплотненном щебеночном балласте показали, что время прохождения волны через зернистое среду составляет 1141 мс, при промежуточном уплотнении щебеночного балласта – 581.1 мс и при максимально уплотненном щебеночном балласте, время распространения упругой волны составляет – 262 мс.

4. При увеличении уплотнения щебеночного балласта время прохождения волны уменьшается. Поэтому по времени распространения волны удара от источника импульса к принимающему датчику можно проводить оценку степени уплотнения балласта железнодорожного пути.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		56

5. Установлено, что уменьшение времени прохождения упругой волны через щебеночный балласт при максимально уплотненном балласте к разуплотненного составляет 4,5 раза. Поэтому по времени распространения упругой волны можно принимать решение о степени уплотнения щебеночного балласта железнодорожного пути.

6. Для контроля степени уплотнения щебеночного балласта железнодорожного пути рекомендуется использовать неразрушающие методы, которые позволяют определить время распространения упругой волны удара в зависимости от степени уплотнения балласта.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		57

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту. Затверджений постановою Кабінету міністрів України (у чинній редакції) [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/494-2013>.
2. Esveld C. Modern railway track. / Coenrad Esveld. – [Second edition]. – MRT-Production, 2001. – 653 p.
3. ГОСТ 7392 – 85. Щебень из природного камня для балластного слоя железнодорожного пути.
4. 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).
5. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц – М.: Транспорт, 1987. – 535 с.
6. ТУ 32 ЦП-782-92. Смесь песчано-щебеночная из отсеков дробления серпентинитов для балластного слоя железнодорожного пути. – 01 августа 1992.
7. ERRI D 182/RP 4. Einheitliche Beurteilungskriterien Der Schotterqualität Und Bewertungsmethoden Des Schotterzustandes Im Gleis. Utrecht, März, 1995.
8. DBS 918 061 Technische Lieferbedingungen. Gleisschotter. August 2006.– 31 s.
9. Klotzinger E. Der Oberbauschotter. Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung / Erwin Klotzinger // Eisenbahntechnische Rundschau, 2008. – №1-2. – S. 34-41.
10. Röthlisberger F. Los Angeles-Prüfung für Gleisschotter – Aussagekraft und Folgerung / François Röthlisberger, Jürg Däppen, Erich Kurzen [u.a.] // Eisenbahntechnische Rundschau, 2005, – №6. – S. 355-361.
11. Lichtberger B. Track Compendium / Bernhard Lichtberger. – Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG 2005. – 634 p.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		58

12. Röthlisberger F. Zertrümmerung von Schotterkörnern durch Gleisstopfungen / François Röthlisberger, Gerhard Schmutz, Erich Kurzen [u.a.] // Eisenbahningenieur, 2005. – №10 (56). – S. 18-21.

13. Holzfeind J. Qualitätsverhalten von Gleisen – Zusammenhänge zwischen Parameterkennwerten und Verschlechterungsverhalten / Jochen Holzfeind, Robert Hummitzsch // ZEVrail, 2009. – №6-7 (133) . – S. 240-250.

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

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

16. Sysyn M. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / Sysyn M., Gerber U., Kovalchuk V., Nabochenko O. //Archives of Transport, 47(3), 2018. – 91-107. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512>

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

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

19. Gerber U. Setzungsverhalten des Schotters / Ulf Gerber // Železniční dopavní cesta. Sborník přednášek 17.-18.2. 2010, Decin, 2010. Konferenzband. – S. 117 122.

20. Gerber U. Setzungsverhalten des Schotters / Ulf Gerber, Wolfgang Fengler. // Eisenbahntechnische Rundschau, 2010. – №4. – S. 170-175.

21. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

22. Verruijt A. Soil dynamics. – Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2008. – 417 p.

23. 2002 DESIGN GUIDE A Product of Project NCHRP 1-37A

24. Suto K. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		59

ground competence: an introduction // Engineering Advances in Earthworks / Australian Geomechanics Society. – 2007. – P. 71–81.

25. 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.

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

27. Park C.B., Miller R.D., Miura H. Optimum field parameters of an MASW survey // Japanese Society of Exploration Geophysics (SEG-J) Extended Abstracts (22–23 May 2002). – Tokyo, Japan, 2002.

28. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic seismic data // Geophysics. – 1987. – Vol. 52, no. 3. – P. 289–300.

29. Ryden N., Park C.B. Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra // Geophysics. – 2006. – Vol. 71, no. 4. – P. 49–58.

30. Xia J., Miller R.D., Park C.B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves // Geophysics. – 1999. – Vol. 64, no. 3. – P. 691–700.

31. Даніленко Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість (ЦП/0117). Затверджено наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. №960 ЦЗ. / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін.— Київ: Транспорт України, 2006. — 168 с.

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

33. Леманский А. П. Упругие свойства щебеночного балласта при статическом нагружении / А. П. Леманский // Вестник ВНИИЖТ, 2003.– № 4.

34. Леманский А. П. Экспериментальные исследования деформативных свойств щебня фракции 25...60 мм в лабораторных условиях / А. П. Леманский // Вестник ВНИИЖТ, 2003.– № 5.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		60

35. Gerber U. Setzungsverhalten des Schotters / Ulf Gerber // *Železniční dopravní cesta. Sborník přednášek 17.-18.2. 2010, Decin, 2010. Konferenzband.* – S. 117-122.

36. Gerber U. Setzungsverhalten des Schotters / Ulf Gerber, Wolfgang Fengler. // *Eisenbahntechnische Rundschau*, 2010. – №4. – S. 170-175.

37. Хействер, Б. О допускаемых напряжениях на земляное полотно [Текст] / Б.Д. Хействер // *Труды ВНИИЖТ, Вып. №97.* – М.: Трансжелдориздат, 1955. – С. 386–410.

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

39. 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.

40. Hettler A. Bleibende Setzungen des Schotteroberbaus / Hettler A. // *Eisenbahntechnische Rundschau*, 1984, Heft 33. – S. 847-854.

41. Lichtberger B. Das System Gleis – Optimierungspotenziale aus Sicht des Instandhalters / Bernhard Lichtberger // *Eisenbahn Ingenieur Kalender (EIK)*, 2009. – №1. – S. 33-52.

42. IRS 677131 <https://uic.org/standardisation/irs>

43. 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.* – 21(2), 2019. – pp. 81–88.

44. Sysyn M. Experimental study of railway trackbed pressure distribution under dynamic loading / M. Sysyn, V. Kovalchuk, O. Nabochenko, Yu. Kovalchuk, O. Voznyak // *The Baltic journal of road and bridge engineering.* – Volume 14, Issue 4, 2019. – pp. 504–520.

45. Historic data on track geometry in relation to maintenance [Text] // *Rail Engineering International Edition.* – 1988. – № 2. – S. 16–19.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		61

46. Freudenstein, S. / S. Freudenstein, M. Romstötter // International Railway Journal. – 2004. – № 5. – P. 44, 46.

47. Певзнер, В.О. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов [Текст] / В.О. Певзнер, С.С. Надежин, А.В. Анисин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 4. – С. 44–47.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		62

## СПИСОК РИСУНКОВ

Рисунок 1.1 – Вид железнодорожного пути на щебеночном балласте.

Рисунок 1.2 – Смесь песчано-щебеночных материалов на железнодорожном пути.

Рисунок 1.3 – Путь на песчаном балласте.

Рисунок 1.4 – Классификация гранулометрического состава в 1, 2 и 3 класса [13].

Рисунок 1.5 – Поперечные профили балластной призмы на однопутных участках железнодорожного пути [4]: а, б, в – из щебня при деревянных шпалах (а – в прямом однопутном участке, б – в кривой, в – на прямом двухпутном участке г, д – из щебня при железобетонных шпалах; г – на прямом однопутном участке, д – в кривой

Рисунок 1.6 – Поперечные профили балластной призмы на двухпутных участках железнодорожного пути [4]: е, ё – из щебня при железобетонных шпалах (е – на прямой двухпутном участке, ё – в кривой); ж – по карьерному гравия, ракушечника, песка при деревянных шпалах в кривой на двухпутном участке;  $h_{щ}$  – толщина щебенового слоя под шпалой;  $h_{п}$  – толщина слоя песчаной подушки; d – плечо балластной призмы; А – расширение междупутье в кривой по условиям габарита.

Рисунок 2.1 – Прямая и обратная задача метода SASW.

Рисунок 2.2 – Методика исследования параметров поверхностных волн методом SASW.

Рисунок 2.3 – Схема 24-канальной телеметрической системы при активном образе.

Рисунок 2.4 – Исследование осадки балластного слоя на испытательном стенде ТУ Дрезден [35].

Рисунок 2.5 – Испытательный стенд Hettler [40].

Рисунок 2.6 – Оседания РШР при различных осевых нагрузках [40].

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		63

Рисунок 2.7 – Геотехнический испытательный стенд авторов Ваеßler та Rucker [38].

Рисунок 2.8 – Оседания для шпалы (S3) при статическом, а затем при изменении статического и динамического нагрузок [38].

Рисунок 3.1 – Распределение напряжений в элементах пути.

Рисунок 3.2 – Средние процентные составляющие несущих элементов пути в общей упругости пути.

Рисунок 3.3 – Структурная схема устройства проведения измерений уплотнения щебеночного балластного слоя железнодорожного пути [43, 44]

Рисунок 3.4 – Схема для определения времени распространения волн ударов от центрального шейкера Ш2 к датчикам

Рисунок 3.5 – Время распространения волн удара при неуплотненном щебня при задании импульса от центрального шейкера №2.

Рисунок 3.6 – Распространение вертикальных волн удар по оси z при разуплотненном балласте.

Рисунок 3.7 – Распространения поперечных волн удар по оси Oz при разуплотненном балласте.

Рисунок 3.8 – Процесс уплотнения балласта гидропульсом.

Рисунок 3.9 – График задания нагрузок гидропульсом на щебеночный балласт при промежуточной степени уплотнения балласта.

Рисунок 3.10 – График задания циклической нагрузки на щебеночный балласт при максимальном степени уплотнения балласта.

Рисунок 3.11 – Время распространения волн удара при промежуточном уплотнению щебня и задании импульса от шейкера №2.

Рисунок 3.12 – Распространение вертикальных волн удар по оси Oz при промежуточном уплотнении балласта.

Рисунок 3.13 – Время распространения волн удара при максимально уплотненном щебня при задании импульса от шейкера №2.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		64

Рисунок 3.14 – Распространение вертикальных волн удар по оси Oz при максимальном уплотнению балласта.

Рисунок 3.15 – Сравнение времени прохождения волн удара при различных степенях уплотнения балластного слоя.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		65

## СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица I – Зерновой состав материалов балласта.

Таблица II – Характерные параметры некоторых щебеночных пород.

Таблица III – Размеры балластной призмы на главных, станционных путях и стрелочных переводах.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
						66
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

## АННОТАЦИЯ И КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Дипломная магистерская работа состоит из 4 разделов и общих выводов. Работа содержит 29 рисунков. Общий объем дипломного проекта 68 страниц. Количество использованных источников – 47.

Объект исследований – щебеночный балластный слой железнодорожного пути.

В магистерской работе выполнен анализ нормативных документов стран ЕС и Украиной относительно требований к плотности балластного слоя железнодорожного пути. Проведены лабораторные экспериментальные исследования по определению степени уплотнения балласта железнодорожного пути в зависимости от его уплотнения. Предложены рекомендации по повышению срока службы щебеночного балласта железнодорожного пути.

Установлено, что при увеличении уплотнения щебеночного балласта время прохождения волны уменьшается. Уменьшение времени прохождения упругой волны через щебеночный балласт при максимально уплотненном балласте к разуплотненного составляет 4,5 раза.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, щебеночный балласт, степень уплотнения, эксперимент.

## ABSTRACT AND KEYWORDS

Degree Master's work consists of four chapters and overall conclusions. The work includes 29 figures. The total amount of the degree project 68 pages. The amount of used literature sources – 47.

The object of research is the crushed stone ballast layer of the railway track.

The master's thesis analyzes the normative documents of the EU and Ukraine regarding the requirements for the density of the ballast layer of the railway track. Laboratory experimental researches on definition of degree of consolidation of ballast of a railway track depending on its consolidation are carried out. Recommendations for increasing the service life of crushed stone ballast of the railway track are offered.

					0053.206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		67

It is established that with increasing compaction of crushed stone ballast, the wave time decreases. The reduction of the time of passage of the elastic wave through the crushed stone ballast at the most compacted ballast to the compacted is 4.5 times.

**Key words:** railway track, crushed stone ballast, degree of compaction, experiment.

					0053. 206515.ДР.2021.001	Лист
Из	Лист	№ докум	Подпись	Дата		68