

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВИБРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ ДЛЯ УСЛОВИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

¹Василевич Ю. В., ²Макеев С. В., ³Комиссаров В. В., ³Лапушкин А. С.,
³Гончаров Г. Р.

¹Белорусский национальный технический университет, Минск

²ЗАО «ДОР-МПЗ», Минск

³Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

Введение. Метро, как вид транспорта давно приобрел заслуженную популярность. Минский метрополитен постоянно увеличивает протяженность своих путей, появляются новые станции. Метро характеризуется своей быстротой, надежностью и экологичностью, что привлекает к его использованию все больше и больше людей крупных мегаполисов.

Однако, известно, что метрополитен неглубокого заложения является источником повышенного уровня шума и вибраций, вызываемых воздействием колеса и рельса. Источником вибраций и шума, а также ее усиления являются износ поверхности колес, жесткость рессорного подвешивания составов, стыки рельсов и др. Шум от приближающегося поезда метро, достигает на станции порядка 85 дБ. В свою очередь вибрация, передаваемая от колеса на рельс, передается на железобетонный свод тоннеля, и затем через грунт на близлежащие здания. В конечном итоге повышенная вибрация приводит к появлению трещин, разрушению фундаментов, а также негативно влияет на комфорт проживания и здоровье людей, находящихся в зоне воздействия этой вибрации.

Проблема снижения шума и вибрации является важной составляющей развития инфраструктуры метрополитена. Одним из методов защиты от шума и вибрации на существующих и вновь строящихся линиях метро, является виброизоляция верхнего строения пути. В этой связи возникает проблема рационального выбора конструкции рельсового основания, которая была бы не дорогой в производстве и эксплуатации, а с другой стороны имела бы набор характеристик, отвечающих современным требованиям по шуму, вибрации, прочности и надежности.

Виброзащита верхнего строения пути метрополитена. Известны деревянные шпалы, которые широко используют в качестве подрельсового основания пути метрополитена, обладающие рядом положительных качеств, а именно, обеспечивают хорошее вибро-шумопоглощение, мягкую передачу вибрации и обладают низкой электропроводностью [1].

Однако, в связи с повышенной влажностью в тоннелях, деревянные шпалы, несмотря на углубленное антисептирование, подвергаются гниению и их срок службы не превышает 15–20 лет. В виду мягкости древесины при регулярных динамических воздействиях (интенсивность движения поездов каждые 2–3 минуты в течение 20 часов в сутки) в местах крепления рельса к шпалам быстро появляются трещины и возникают проблемы с надежностью крепления. Деревянные шпалы условно можно принять за эталон по уровню эффективности виброгашения.

Известны также бетонные шпалы, которые имеют высокую прочность и долговечность по сравнению с деревянными шпалами [2]. Однако их использование приво-

дит к повышению жесткости конструкции, повышению шума и вибраций, что отрицательно влияет на тоннельные сооружения.

Эксплуатационные нагрузки на путь в метро ниже, чем нагрузки на железнодорожный путь общего назначения, поэтому при прокладке железнодорожного пути метро применяются полу шпалы, которые обладают рядом преимуществ по отношению к шпалам, например, так как их длина составляет примерно половину длины обычной шпалы, то стоимость полу шпалы гораздо ниже. Важным преимуществом полу шпалы, по сравнению со стандартной железобетонной шпалой, также является возможность с наименьшими временными и трудовыми затратами производить ремонт железнодорожного пути или проводить иные технологические работы. С учетом того, что эксплуатационные осевые нагрузки на путь метрополитена ниже, чем нагрузки на железнодорожный путь общего назначения, перспективы массового использования железобетонных полу шпал, или аналогичных им изделий, для возведения линий метро и трамвайных линий, представляются обоснованными. Однако и использование полу шпал из железобетона при прокладке пути в метро также приводит к повышенному шуму и вибрациям.

С учетом данного обстоятельства объектами исследования в данной работе являлись модификации конструкции верхнего строения безбалластного железнодорожного пути для метрополитенов, представленные бетонными блоками БОМ-В, разработанные на предприятии ЗАО «ДОР-МПЗ» (рисунок 1). Основным виброизолирующим элементом в конструкции блоков опорных с виброизоляцией является система из набора виброгасящих прокладок (7), которая обеспечивает требуемую жесткость опорного блока, а также соответствующий вертикальный прогиб связанного с ней рельса.

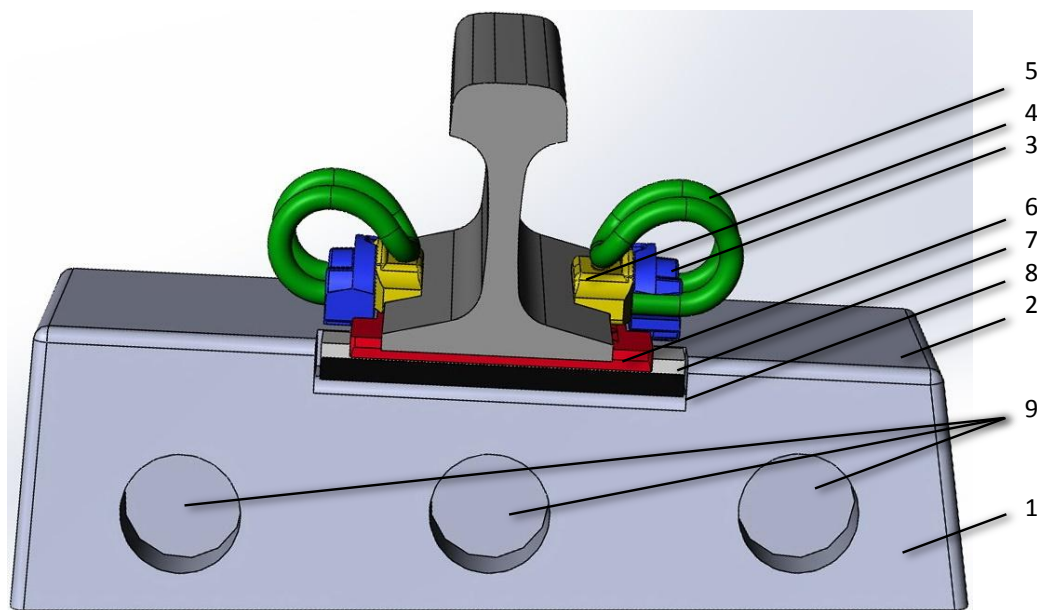


Рис. 1. Устройство бетонного блока БОМ-В: 1 – монолитный армированный железобетонный блок, переменный по длине сечения; 2 – наклонная часть (подуклонка рельсовой площадки) блока опорного; 3 – анкер; 4 – изолятор; 5 – клемма пружинная; 6 – подрельсовая прокладка; 7 – набор виброгасящих прокладок; 8 – выемка для установки набора виброгасящих прокладок; 9 – выемка для бетонирования и удержания от вырывания блока опорного

Испытания блоков БОМ-В производились при различных модификациях виброизолирующих слоев. В конструкцию вносились изменения по виду используемого мате-

риала, твердости виброизоляционных прокладок (50, 61, 65, 75 и 82 ед. твердости по Шору А), их толщины, материала опорной площадки, а также их комбинации.

Таким образом, вариативный ряд конструкций состоял из перечисленных наименований. Общая сводка подвергаемых циклическим испытаниям конструкций представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Вариативный ряд испытываемых конструкций

Обозначение конструкции	Количество виброгасящих прокладок, шт	Твердость виброгасящих прокладок, ед. по Шору А	Материал используемой опорной площадки
<i>БОВ-М 01</i>	<i>1</i>	<i>65</i>	<i>Металл</i>
<i>БОВ-М 02</i>	<i>1</i>	<i>65</i>	<i>Текстолит</i>
<i>БОВ-М 03</i>	<i>1</i>	<i>75</i>	<i>Металл</i>
<i>БОВ-М 04</i>	<i>1</i>	<i>75</i>	<i>Текстолит</i>
<i>БОВ-М 05</i>	<i>1</i>	<i>82</i>	<i>Металл</i>
<i>БОВ-М 06</i>	<i>1</i>	<i>82</i>	<i>Текстолит</i>
<i>БОВ-М 07</i>	<i>2</i>	<i>65+82</i>	<i>–</i>
<i>БОВ-М 08</i>	<i>2</i>	<i>ПУ50+ПУ50</i>	<i>Текстолит</i>
<i>БОВ-М 09</i>	<i>1</i>	<i>ПУ50</i>	<i>Металл</i>
<i>БОВ-М 10</i>	<i>1</i>	<i>ПУ50</i>	<i>Текстолит</i>
<i>БОВ-М 11</i>	<i>2</i>	<i>ПУ50+ПУ82</i>	<i>Металл</i>
<i>БОВ-М 12</i>	<i>1</i>	<i>61</i>	<i>Металл</i>

Натурные испытания по оценке колебаний передающихся на основание от моделируемого динамического воздействия подвижного состава метрополитена посредством циклического нагружения для разрабатываемой конструкции рельсового пути проводились в соответствии с СТБ ГОСТ Р 51399-2001 [1] по пп. 5–9.1.

Уровни вибрации определялись для случая циклического нагружения.

Для определения численных значений уровней вибрации проводилось измерение трехканальным датчиком с помощью виброметров «Октава 101-ВМ», «Октава Экофизика» в режиме автоматической регистрации среднеквадратичных уровней со временем усреднения 1 с. Канал датчиков вибрации были сориентированы по вертикальному направлению Z. Датчики вибрации крепились к исследуемой конструкции в соответствии с требованиями СТБ ИСО 5348-2001 «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров» [4].

Обработка результатов измерений уровней вибрации проводится в лабораторных условиях на ПК с использованием программного обеспечения «Октава» и с помощью электронных таблиц MS Excel.

Циклическое нагружение производится с применением пульсатора сервогидравлической универсальной разрывной машины TC244.31A (рисунок 2). Подача и контроль испытательных параметров циклического нагружения производилась посредством программного комплекса Station Manager «MTS Flextest 40».

Измерения производились в контрольных точках, указанных на (рисунке 3). В качестве характерных точек принимались точки, расположенные на подошве рельса, верхней поверхности бетонного блока, металлической плите (основании) испытательного оборудования.

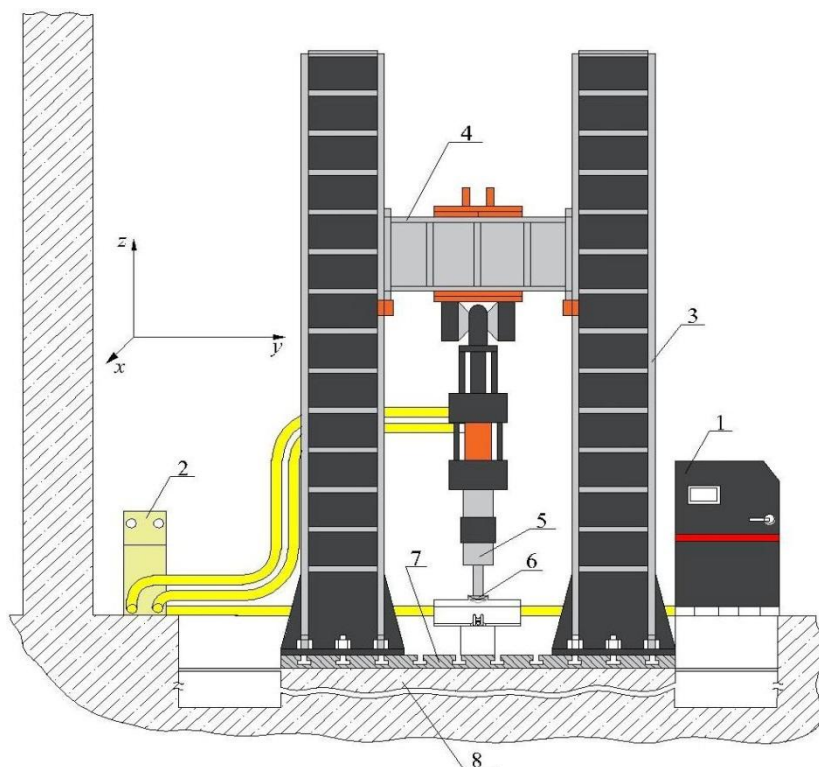


Рис. 2. Общий вид испытательной установки: 1 – насосная станция низкого давления; 2 – насосная станция высокого давления; 3 – стойка; 4 – балка с подвесным цилиндром-пульсатором; 5 – цилиндр-пульсатор; 6 – приспособление имитирующее контакт колеса и рельса; 7 – металлическая плита с пазами; 8 – железобетонное основание

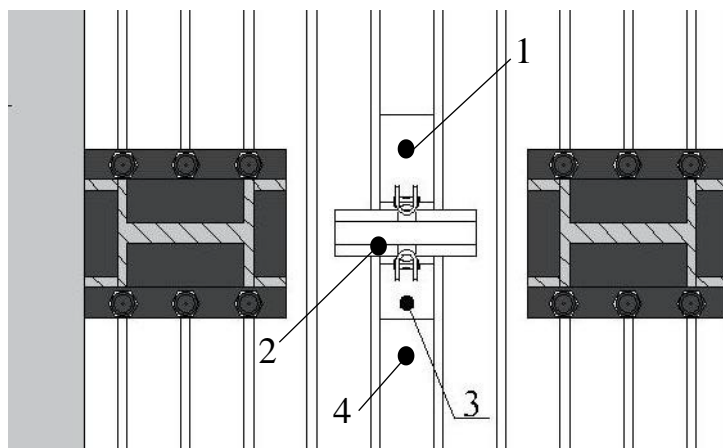


Рис. 3. Расположение контрольных измерительных точек

Воздействие циклической нагрузки передавалось через имитатор колеса подвижного состава (рисунок 4). В соответствии с ранее проведенными натурными измерениями на путях метрополитена на головку рельса прикладывалась нагрузка $40 \text{ кН} \pm 10 \text{ кН}$, как наиболее характерная для условий эксплуатации Минского метрополитена. Таким образом, в процессе испытаний минимальная нагрузка на головку рельса составляла 30 кН , а максимальная – 50 кН . Для анализа виброизоляции рассматриваемых вариантов конструктивного исполнения верхнего строения пути рассматри-

вались только колебания в вертикальной плоскости. Нагружение осуществлялось с частотой 10 Гц, что соответствует частоте прохода тележки подвижного состава метрополитена базой 2,1 м на максимальной скорости 80 км/ч (максимальная скорость движения подвижного состава в метрополитене).



Рис. 4. Имитация взаимодействия колеса и рельса на испытательной установке

Анализ литературных источников также показал, что при эксплуатации подвижного состава метрополитена наибольший спектр вибрации, как на поверхности грунта, так и на поверхности фундаментной плиты приходится на диапазон частот 31,5–63 Гц. В этой связи дополнительно испытания проводились в октановой полосе частот 31,5 Гц – на частотах 25 и 37,5 Гц и 63 Гц – на частотах 50 и 66,7 Гц.

В результате проведенной работы рассмотрена работоспособность по критериям виброгашения для широкого круга используемых элементов виброгасящего слоя на примере одной, неизменной конструкции блока при циклическом нагружении (характерном для нормального периода эксплуатации).

В результате проведенных циклических испытаний 12 вариантов конструктивного исполнения блоков получены данные по уровню виброгашений в исследуемом диапазоне частот (рисунок 5). Максимальные значения виброускорения наблюдаются на частотах нагружения.

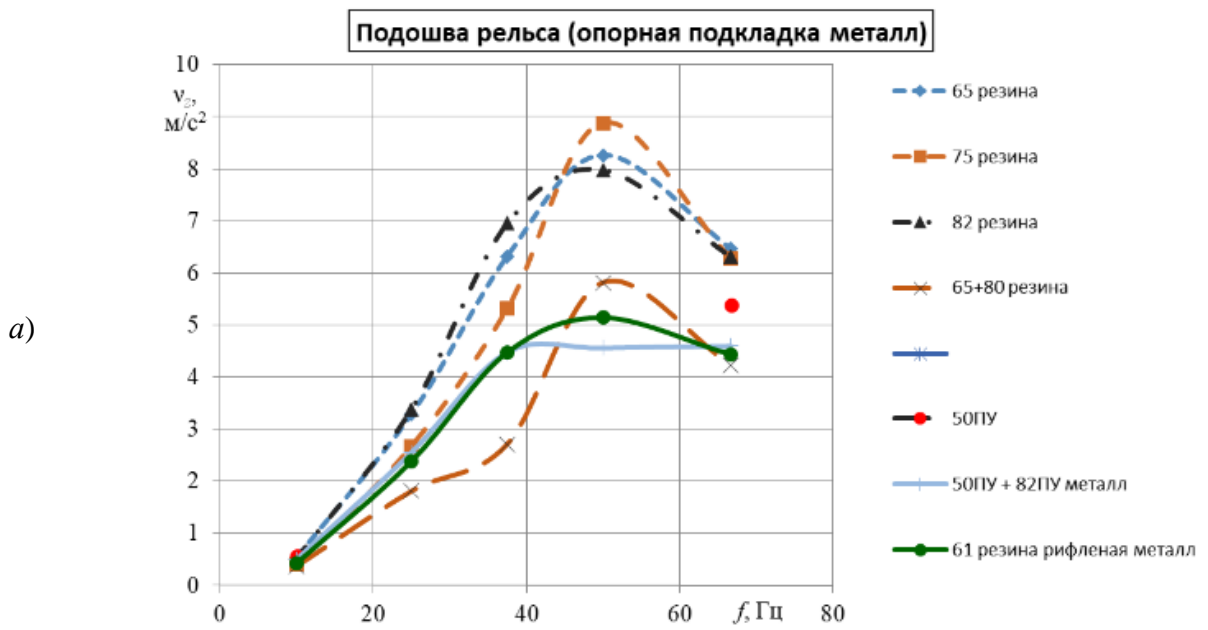


Рис. 5. Зависимости максимальных значений виброускорения от частоты нагружения (подошва рельса): а – опорная подкладка металл; б – опорная подкладка текстолит

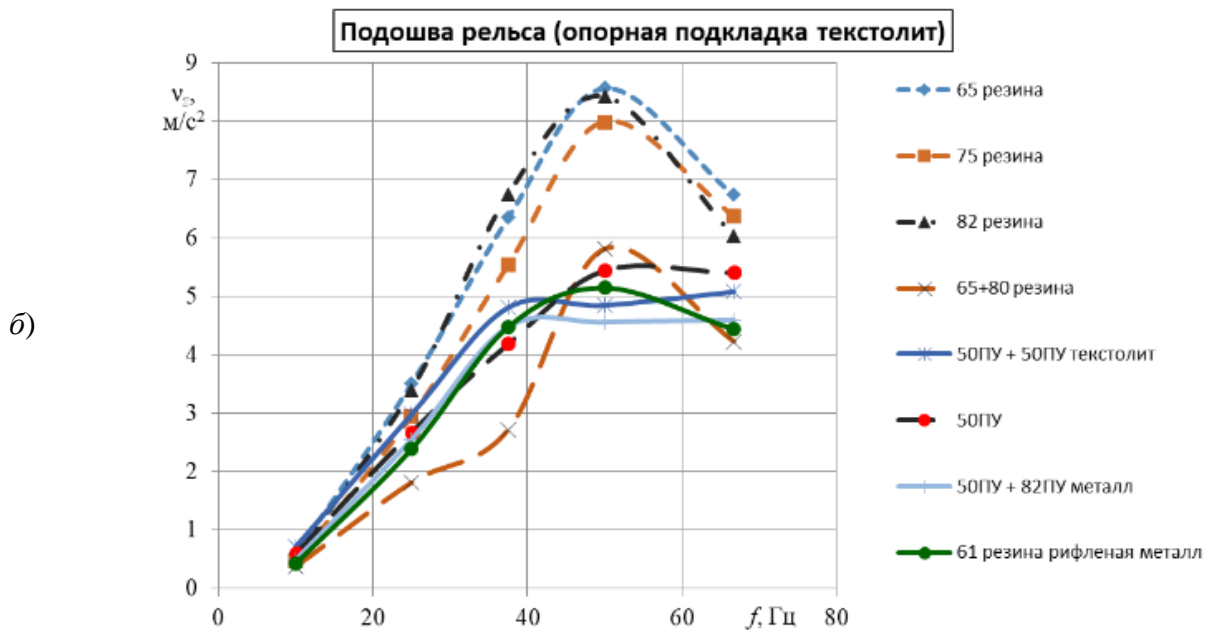


Рис. 5. (Продолжение) Зависимости максимальных значений виброускорения от частоты нагружения (подошва рельса): а – опорная подкладка металл; б – опорная подкладка текстолит

Анализ данных зависимостей показывает, что использование металлической опорной пластины или пластины из текстолита той же толщины не оказывает существенного влияния на результаты виброускорения при реализованном нагружении.

Т. е. можно констатировать, что испытанные резиновые прокладки одной конструкции имеющие различную твердость (65, 75, 82 по Шору) имеют сопоставимые показатели по критериям виброгашения. Таким образом, при реализованном режиме нагружения в различном диапазоне воздействующих частот механические характеристики

вибропрокладок одного конструктива не оказывают заметного влияния на снижение величин виброускорения.

Изменение конструкции блока путем увеличения толщины виброизолирующего слоя резиновых прокладок и совместное нагружение двух резиновых прокладок твердостью по Шору 82 и 65 ед. способствует снижению виброускорения во всем диапазоне частот нагружения в среднем до 50 % (см. рисунок 5 и 6).

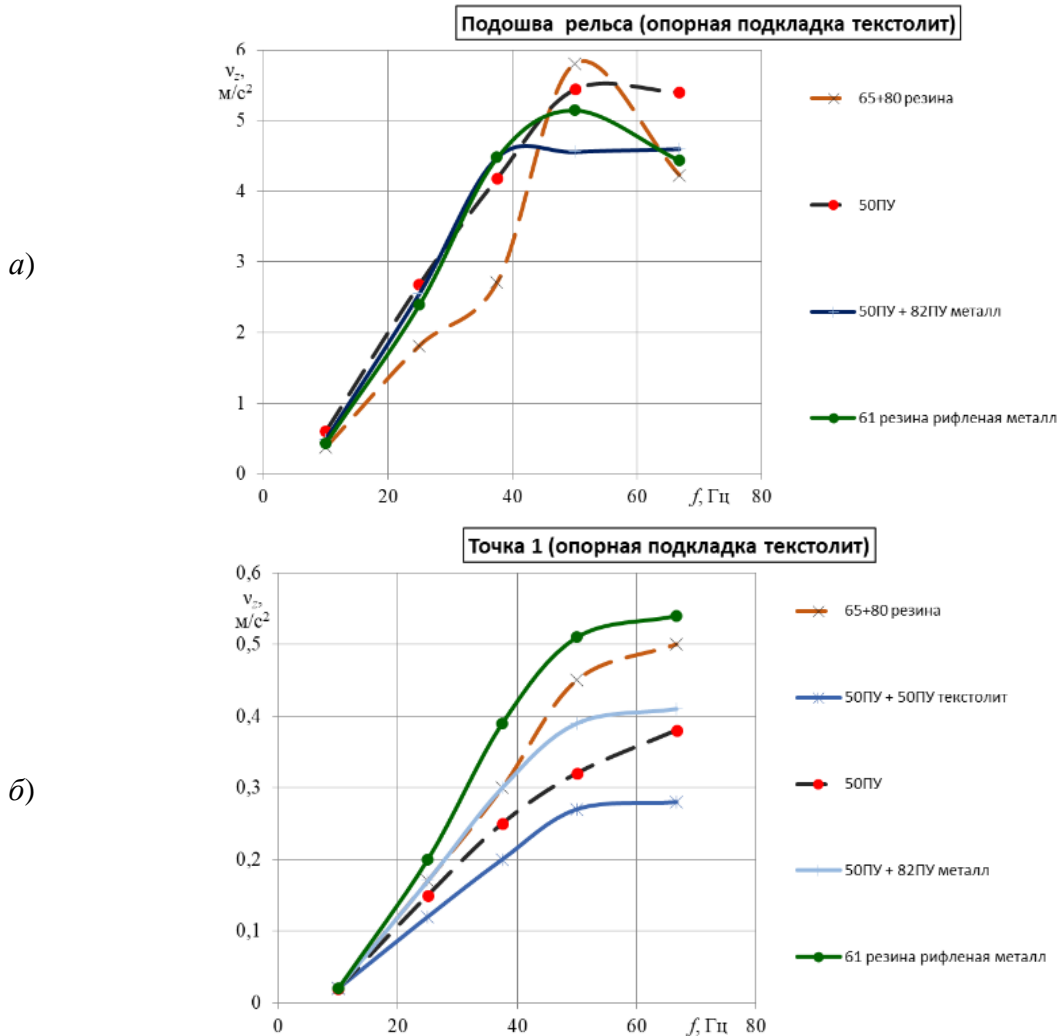


Рис. 6. Зависимости максимальных значений виброускорения от частоты нагружения для измененных конструкций виброизолирующего слоя (опорная подкладка текстолит):
a – подошва рельса; *б* – точка 1

Вариант блока с двумя виброизоляционными прокладками из мягкого по твердости полиуретана (50 единиц по Шору) при частоте 10 Гц способствует некоторому повышению вибрации на рельсе. Однако в диапазоне частот 31,5–63 Гц (наиболее характерных при эксплуатации подвижного состава метрополитена, когда наблюдается наибольший спектр вибрации на поверхности грунта и поверхности фундаментной плиты) наблюдается заметное снижение вибрации. Таким образом, изменение геометрии блока за счет увеличения толщины изолирующего слоя показывает, что мягкий слой лучше гасит высокочастотные колебания. Остается только установить предельные размеры изолирующего слоя с позиции жесткости всей несущей конструкции верхнего строения пути.

Схожие зависимости наблюдаются и для других удаленных от зоны приложения нагрузок контрольных точек (рисунок 7).

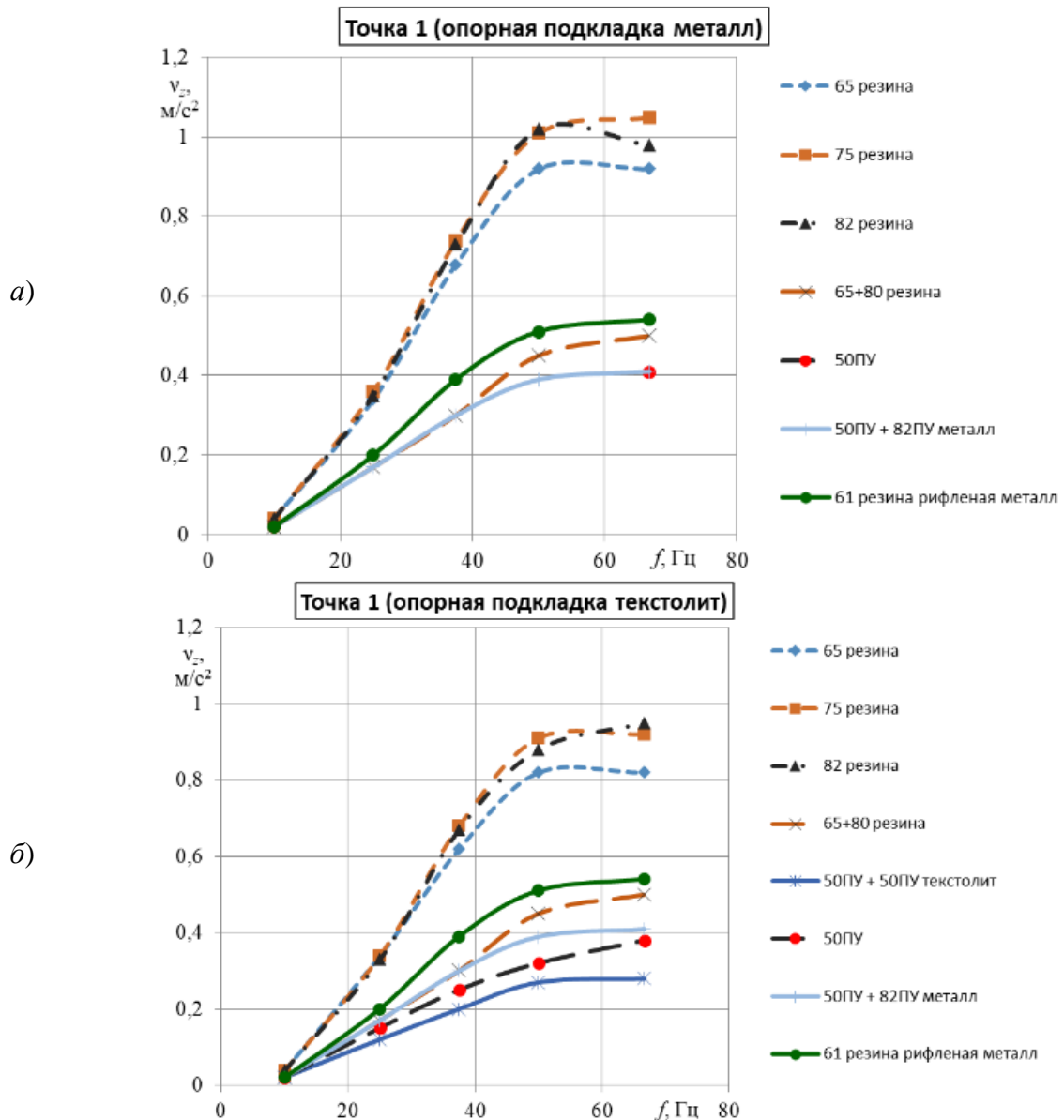


Рис. 7. Зависимости максимальных значений виброускорения от частоты нагружения (точка 1):
a – опорная подкладка металл; *б* – опорная подкладка текстолит

В этом случае начинает просматриваться тенденция по снижению виброактивности со снижением твердости резиновых прокладок одной конструкции. Эта же особенность наблюдается и для вариантов с увеличенной толщиной виброизолирующего слоя.

Выводы. 1. При реализованном режиме нагружения в различном диапазоне воздействующих частот механические характеристики вибропрокладок одного конструктива не оказывают заметного влияния на снижение величин виброускорения в зоне воздействия. При удалении от данной зоны наблюдается тенденция снижения виброактивности при снижении твердости элементов виброизолирующего слоя.

2. Использование металлической опорной пластины или пластины из текстолита той же толщины не оказывает существенного влияния на результаты виброускорения и характер зависимостей от прилагаемых частот.

3. Увеличение толщины виброизолирующего слоя приводит к снижению максимальных значений виброускорения на 30–40 % в зоне приложения нагрузки и до 50 % в точках конструкции удаленных от зоны источника вибрации.

4. Одновременное увеличение толщины и снижение твердости элементов виброизолирующего слоя в общем случае приводит к дополнительному снижению максимальных значений виброускорения, однако такие изменения ограничены жесткостью верхнего строения пути, при достижении которой может быть нарушена безопасность движения.

5. Простота конструкции блока БОМ-В, не требующая затрат на обслуживание, низкая стоимость и широкое распространение промежуточного рельсового скрепления СБ-3, на базе которого он сделан, позволяет рекомендовать для использования его на участках метрополитена с последующим проведением натурных испытаний. Это позволит произвести их полную оценку по выбранным критериям и уточнить методику ускоренных лабораторных испытаний [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 22830-77. Шпалы деревянные для метрополитена. Технические условия.
2. ГОСТ 33320-2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия.
3. ГОСТ Р 51399-2001. Вибрация. Измерения вибрации внутри железнодорожных туннелей при прохождении поездов.
4. СТБ ИСО 5348-2001 «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров».
5. ИСО 4866-90 Вибрация и удар. Вибрация зданий. Руководство по измерению вибрации и оценке ее воздействия на здание.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
7. ГОСТ 31368.4-2008 «Вибрация. Измерения виброакустических передаточных характеристик упругих элементов конструкций в лабораторных условиях. Часть 4. Динамическая жесткость не опорных упругих элементов конструкции для поступательной вибрации».
8. ГОСТ Р ИСО 2017-2-2011 Вибрация и удар. Упругие системы крепления. Часть 2. Технические данные для применения систем виброизоляции для железнодорожного транспорта.

Поступила: 30.03.2022