

- опробование изоляционного материала для оптимального заполнения швов между готовыми железобетонными элементами;

- проверка метода очистки поверхностей от выдавливаемого наружу изоляционного материала.

Эксперименты подтвердили правильность теоретических предпосылок. Было установлено также, что частичные или общие разрушения слоя асфальтобетона можно устранять простыми техническими средствами, не требующими значительных расходов. Работы проводили в следующем порядке:

- установка строительных лесов;
- бурение по заданной сетке колонковых отверстий диаметром 25 мм в железобетонных элементах для размещения инъекционных головок;
- изоляция вертикальных и горизонтальных швов между элементами;
- инъектирование гидроструктурированных смол;
- отвод инъекционных головок, предварительное удаление геля с краев отверстий, заливка в отверстия специального раствора;
- снятие излишков изолирующего материала в зоне стыков железобетонных элементов;
- очистка элементов.

После завершения инъекционной обработки в зоне уплотнительной стенки (до высоты 4 м) начали создавать подпор воды. На обработанной поверхности не были обнаружены заметные места просачивания, а выше отметки 4 м утечки были значитель-



Рис. 4. Керн, взятый из опытной системы бетонная панель — асфальтобетон (правая часть — слой асфальтобетона, уплотненного гидроструктурированной смолой)

ными. Это стало последним доказательством эффективности инъекционной герметизации гидроструктурированной смолой.

На основе успешно проведенных пробных инъекций было принято решение о герметизации этим методом всей поверхности плотины. По завершении работ водохранилище заполнили до уровня, соответствующего состоянию на 5 декабря 2002 г. Требования по соблюдению норм утечек и просачивания воды были выполнены.

R. Angst, H. Graeve. Eisenbahningenieur, 2004, № 7, S. 44 – 49.

Динамические свойства резиновых рельсовых подкладок

Для оптимизации статического и динамического поведения пути между рельсами и шпалами помещают подкладки. Требования, предъявляемые к ним, определяются в основном взаимодействием подвижного состава и пути, а также уровнем излучаемого шума качения. В берлинском техническом университете проведены экспериментальные исследования упругих подкладок типа ZW 700, выпускаемых компанией Saargitmi (SGW). Эти исследования были направлены на изучение поведения резиновых подкладок при нагрузках с низкой, средней и высокой циклическостью. Дополнительно рассмотрена математическая модель взаимодействий в системе подвижной состав — путь, предназначенная для проведения расчетов и определения параметров материала упругих подкладок.

Совершенствование рельсовых подкладок играет важную роль в связи с возрастающими нагрузками на путь и подвижной состав и шумом, излучаемым в процессе качения колес по рельсам. Подкладки являются единственным элементом пути, который без особых проблем можно выборочно заменять в эксплуатации, а также полностью при изменившихся условиях эксплуатации.

При динамическом моделировании пути подрельсовую подкладку представляли ранее в виде параллельного соединения пружины и демпфера. Результаты расчета коэффициентов жесткости и упругости такой системы приводились во многих исследованиях, однако при этом оставался неясным вопрос о том, какое затухание должно использоваться в модели в сочетании с комплексной жесткостью — вязкостное или структурное. Оставались также не-

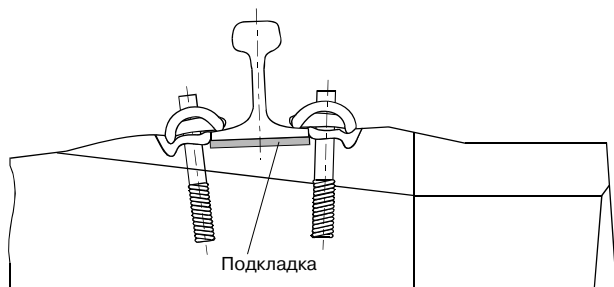


Рис. 1. Монтажное положение упругой подкладки в системе рельсового крепления Vossloh W14 с рельсом МСЖД 60 и шпалой В70W

решенными вопросы влияния на подкладку предварительной нагрузки и колебаний температуры окружающего воздуха. В связи с этим в последние годы проведены обширные экспериментальные исследования динамических свойств упругих подрельсовых подкладок, в частности компанией Pandrol на эксплуатируемом пути и Берлинским техническим университетом в рамках программы DFG.

Постановка вопросов при исследованиях

На высокоскоростных линиях железных дорог Германии (DBAG) компания Saargummi проводила исследование упругих подкладок типа ZW 700. Они изготовлены из вспененной резины, свойства которой могут варьироваться с помощью изменения содержания технического углерода (сажи), используемого в качестве наполнителя. Рельсовая подкладка представляет собой прямоугольную пластину с раз-

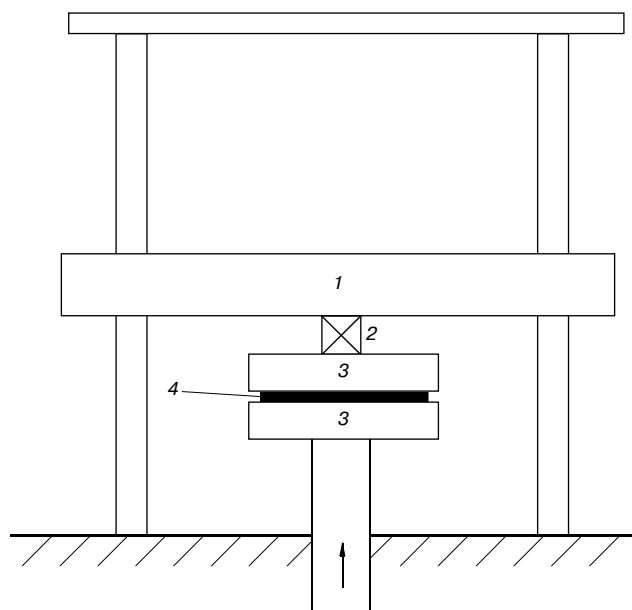


Рис. 2. Экспериментальная установка для квазистатических и низкочастотных лабораторных испытаний материалов:
1 — траверса; 2 — динамометрический датчик; 3 — стальная плита;
4 — резиновая рельсовая подкладка

мерами $160 \times 148 \times 9$ мм. Эти размеры соответствуют ширине подошвы рельса (150 мм) и ширине шпалы В70 (160 мм). Расположение подкладки под рельсом показано на рис. 1.

Нагрузки, рассматривавшиеся в ходе исследований, проведенных техническим университетом, ограничивались квазистатическими и гармоническими (периодическими) возбуждениями различной частоты. Изучалось поведение рельсовых подкладок исключительно под вертикальной нагрузкой. Полученные результаты могут интерпретироваться как динамическая жесткость, для которой возможны различные способы записи. Влияние температуры не изучалось. Под жесткостью подкладки следует понимать значение этого параметра не для используемого материала, а для изделия из него конкретной формы.

В ходе исследований изучено:

- поведение упругой подкладки под действием квазистатической нагрузки и после ее снятия;
- изменение динамической жесткости в функции частоты гармонических возбуждений;
- зависимость динамической жесткости от предварительного нагружения и амплитуды колебаний нагрузки.

Экспериментальные исследования

Принцип работы экспериментальной установки для определения квазистатической и низкочастотной характеристик подкладки представлен на рис. 2. Измерения проводились с помощью универсального стенда для испытаний на вибропрочность. Упругая прокладка располагалась между двумя жесткими стальными плитами. Возбуждающее воздействие измеряли с помощью динамометрического датчика, а изменение расстояния между плитами — двумя индуктивными датчиками перемещений. В расчет принималось среднее значение расстояния из показаний двух датчиков. При квазистатических измерениях нагрузку повышали линейно с темпом 2 кН/с , за исключением специально оговоренных случаев. С таким же темпом нагрузку снижали, при этом измеряли степень сжатия прокладки.

Термины и понятия

На рис. 3 показано графическое отображение процессов статического или квазистатического нагружения, при котором сила возрастает от 0 до 66 кН и затем снижается. Ветви нагружения и снятия нагрузки ограничивают область гистерезиса. После снятия нагрузки остается деформация

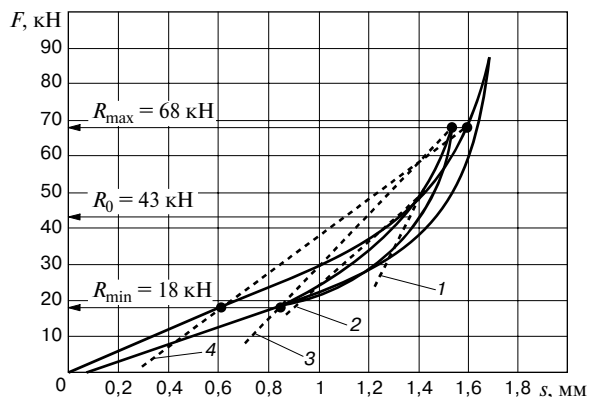


Рис. 3. Квазистатическое нагружение резиновой подкладки Zw 700 с размерами 160×150×7 мм компании Saargummi:

F — сила; s — расстояние; 1 — динамическая тангенциальная жесткость; 2 — статическая тангенциальная жесткость; 3 — динамическая секущая жесткость; 4 — статическая секущая жесткость

(например, около 0,05 мм), которая через некоторое время исчезает.

Статическая секущая жесткость (графически определяемая по секущей) в соответствии с проектом стандарта DBAG TL 918235 оценивается по ветви нагружения на отрезке между 18 и 66 кН.

Статическая тангенциальная жесткость — это касательная к ветви нагружения в точке, соответствующей 43 кН.

Для определения **динамической секущей жесткости** подкладку нагружали и разгружали относительно среднего значения 43 кН в диапазоне 18 – 68 кН. По окончании цикла между ветвями образуется область гистерезиса, имеющая вид узкого изогнутого эллипса.

В графическом исследовании процессов нагружения используется также параметр **динамической тангенциальной жесткости**. Все динамические величины зависят от частоты и амплитуды прикладываемых колебаний и от величины предварительной нагрузки.

При небольших амплитудах нагружения петля гистерезиса становится более узкой, располагается круче и приобретает вид эллипса без изгиба. Разница между секущей жесткостью и тангенциальной, образованной большой полуосью эллипса, в этом случае исчезает. В диапазоне больших амплитуд нагружения подобное определение тангенциальной жесткости через большую полуось эллипса невозможно, так как линии повышения и снижения нагрузки быстро приобретают кривизну, образуя изогнутую петлю гистерезиса.

Если задать гармоническое нагружение подкладки, то кривую сближения плит можно анализировать с использованием рядов Фурье. Из отношения амплитуды нагрузки к амплитуде сближения плит можно получить эквивалентную комплексную жесткость:

$$k_{p,dyn-kompl} = k_p' + ik_p'' = |k_p|e^{i\beta}, \quad (1)$$

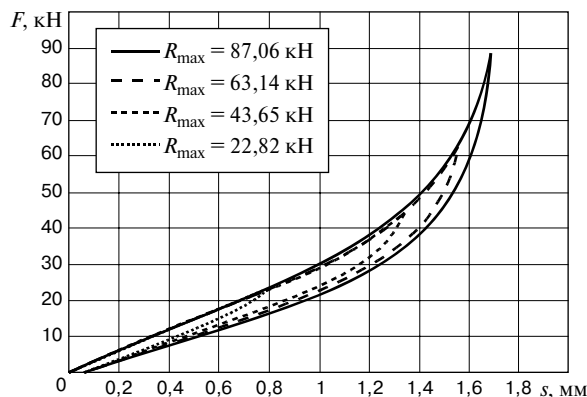


Рис. 4. Квазистатическое нагружение подкладки с темпом повышения нагрузки 1 кН/с для четырех различных значений максимальной нагрузки R_{max} :

обозначения осей, как на рис. 3

где k_p' — модуль накопления; k_p'' — модуль потерь; $|k_p|$ — абсолютное значение комплексной жесткости; β — угол потерь.

Если используется модель пружина — демпфер, выражения для эквивалентной жесткости $k_{p,eq}$ и демпфирования $c_{p,eq}$ будут иметь вид:

$$k_{p,eq} = k_p' \text{ и } c_{p,eq} = \frac{1}{\Omega} k_p'', \quad (2)$$

где Ω — параметр вязкости.

Результаты экспериментов и их интерпретация

Квазистатическое нагружение

При квазистатических процессах повышения и снижения нагрузки в случае различных максимальных нагрузок всегда получаются гистерезисные петли в виде изогнутых эллипсов (рис. 4). Если темп повышения и снижения нагрузки изменяется от 0,005 кН/с (около 5 ч нагружения и 5 ч разгрузки) до 20 кН/с, кривые почти не изменяются. Площадь гистерезиса почти не зависит от темпа нагружения. Исследования показали, что трение между стальными плитами и резиновой подкладкой качественно на результат не влияет. Причиной возникновения гистерезиса является внутреннее трение резины. В ряде исследований, посвященных свойствам упругих материалов, такое поведение резины называют вязкопластичным.

Материал подкладки в незначительной степени обладает и вязкоупругими свойствами, так как после снятия нагрузки остается некоторое сжатие, которое через определенный промежуток времени исчезает. Нелинейно-упругое уменьшение толщины подкладки на ветви нагружения достигает 20 %, т. е. относительно велико.

Гармоническое низкочастотное нагружение

Результаты экспериментов при предварительной нагрузке 43 кН, частоте 10 Гц и разных амплитудах гармонических колебаний нагрузки представлены на рис. 5. Из него следует, что кривые гистерезиса при уменьшении амплитуды колебаний выпрямляются, т. е. жесткость возрастает. Если же рассматривать и разные величины предварительной нагрузки, то при их росте жесткость тоже увеличивается.

На рис. 6 сопоставлены статическая секущая жесткость и три динамические жесткости в диапазоне частот 0 – 30 Гц. Влияние частоты, начиная от значений выше 5 Гц, проявляется в небольшой степени. Между динамической секущей жесткостью 3 ($k_{p, dyn-sec}$) и эквивалентной динамической 2 ($k_{p, eq} = k'_p$) при одинаковой амплитуде колебаний нагрузки, принятой равной 25 кН, заметной разницы нет. Динамическая тангенциальная жесткость 1 ($k_{p, tan}$), напротив, вдвое выше.

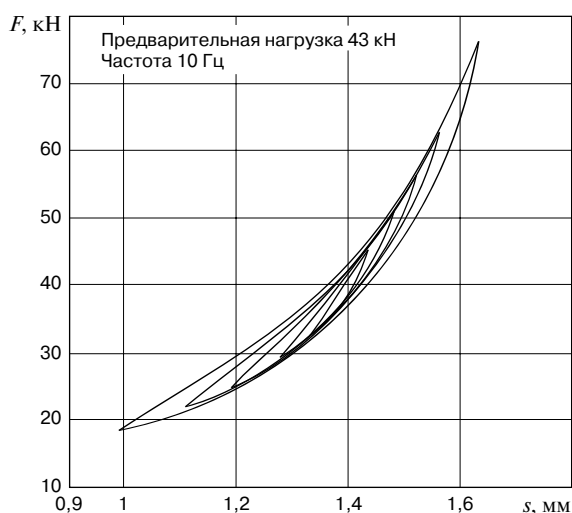


Рис. 5. Кривые гистерезиса для динамического нагружения подкладки гармоническими колебаниями низкой частоты: обозначения осей, как на рис. 3

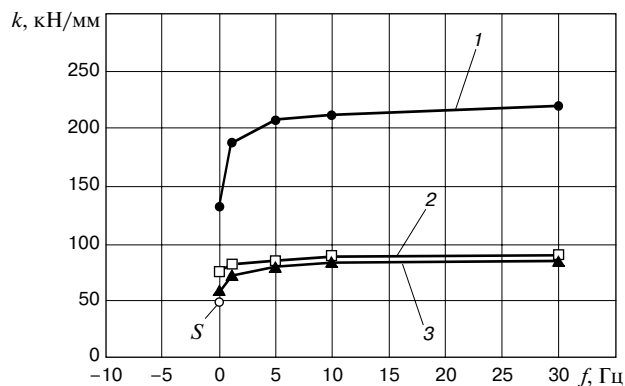


Рис. 6. Сравнение различных жесткостей подкладки в низкочастотном диапазоне нагружения для предварительной нагрузки $R_0 = 43$ кН: f — частота; k — жесткость; S — статическая секущая жесткость; 1 — тангенциальная жесткость; 2 — эквивалентная жесткость; 3 — динамическая секущая жесткость

Гармоническое нагружение средней и высокой частоты

Эксперименты на испытательном стенде возможны только при частотах до 50 Гц. Для частот выше 100 Гц в любом случае требуется другая установка, на которой, однако, возможны лишь небольшие колебания нагрузки. По этой причине на ней можно определять только тангенциальную жесткость. В то же время исследования показали, что тенденция к заметному снижению эквивалентной динамической жесткости с увеличением амплитуды колебаний нагрузки, выявленная в области низких частот, сохраняется и для диапазона 100 – 1000 Гц. В связи с этим основной целью проводившихся экспериментов было определение характера зависимости тангенциальной жесткости от частоты и предварительной нагрузки.

Результаты можно видеть из рис. 7. Горизонтальная ось имеет логарифмический масштаб, вертикальная — линейный. Представлены действительная (а) и мнимая (б) части динамической тангенциальной жесткости для двух различных предварительных нагрузок (43 и 25 кН). Они играют важную роль. При 43 кН и частоте 100 Гц действительная и мнимая части вдвое больше, чем при 25 кН. С повышением частоты обе части растут, причем мнимая быстрее действительной.

Испытания подкладок, уложенных в путь

Результаты лабораторных экспериментов сделали возможной лучшую интерпретацию результатов экспериментов с упругими прокладками, уложенными под рельсы на эксплуатируемом участке. Целью их было определение величин жесткости k_p и демпфирования c_p или эквивалентной комплексной жесткости. Кроме того, требовалась модель, которая позволила бы адаптировать результаты моделирования к результатам измерений и таким образом определить искомые величины с учетом особенностей и возможностей экспериментальной установки.

В ней имелась возможность устанавливать разные значения предварительной нагрузки и диапазон ее колебаний. Во время прохождения поездов и нагрузка, и ее колебания велики. При искусственном импульсном возбуждении системы колебания нагрузки минимальны, а предварительная нагрузка ограничивалась усилием нажатия пружинных рельсовых креплений.

Полученные результаты измерений справедливы лишь в определенном диапазоне частот. Например, при проследовании поезда имеет место низкочастотное возбуждение системы. Значения жесткости и

демпфирования, измеренные при испытаниях с импульсными нагрузками и полученные при последующих адаптивных расчетах, справедливы только в диапазоне частот, в котором действие упругой подкладки особенно эффективно (около 500 Гц).

Выводы для моделирующих расчетов

Для расчета диапазона частот нужно иметь линейную модель упругой рельсовой подкладки. Исследования показали, что наиболее целесообразно использовать зависящую от частоты комплексную жесткость. Это равноценно выполнению расчетов на базе зависящих от частоты жесткости k_p и демпфирования c_p . Более важным фактором в сравнении с зависимостью параметров от частоты является значительная зависимость свойств упругой подкладки от предварительной нагрузки и амплитуды колебаний этой нагрузки. Поэтому для различных постановок задач следует применять разные исходные данные. Для действительной части комплексной жесткости рекомендуется диапазон 30 – 100 Гц (таблица). Экстраполяция для более высоких частот может быть выполнена с использованием кривых рис. 7.

Если нужно определить, например, нагрузку на путь из-за некруглости колес (типичный пример для расчета диапазона частот), то следовало бы использовать предварительную нагрузку 43 кН и ее колебания 25 кН или большие значения (полученные экстраполяцией). Действительная часть комплексной жесткости в этом случае лежит ниже 90 кН/мм.

При акустических исследованиях, которые тоже проводятся в определенном диапазоне частот, следует использовать предварительную нагрузку под колесом 43 кН или выше. Амплитуда ее колебаний в большой степени зависит от дефектов геометрии пути. На путях, подлежащих особому контролю, колебания предварительной нагрузки составляют лишь несколько килоньютонов. В этом случае действительная часть комплексной жесткости получается заметно выше 220 кН. Оба этих примера показывают, что жесткость при различных постановках задачи может колебаться более чем в два раза.

Из приведенных рекомендаций можно сделать два принципиальных вывода, важных для проведения моделирующих расчетов:

- при высокой предварительной нагрузке резиновые подкладки имеют большую жесткость, чем при низкой. Если колесо располагается точно над шпалой, предварительная нагрузка ее подкладки составляет примерно 43 кН. При этом на соседней шпале она составляет 25 кН, а на следующей — 18 кН, что соответствует усилию нажатия, создаваемому пружинным рельсовым скреплением. При ослабленном

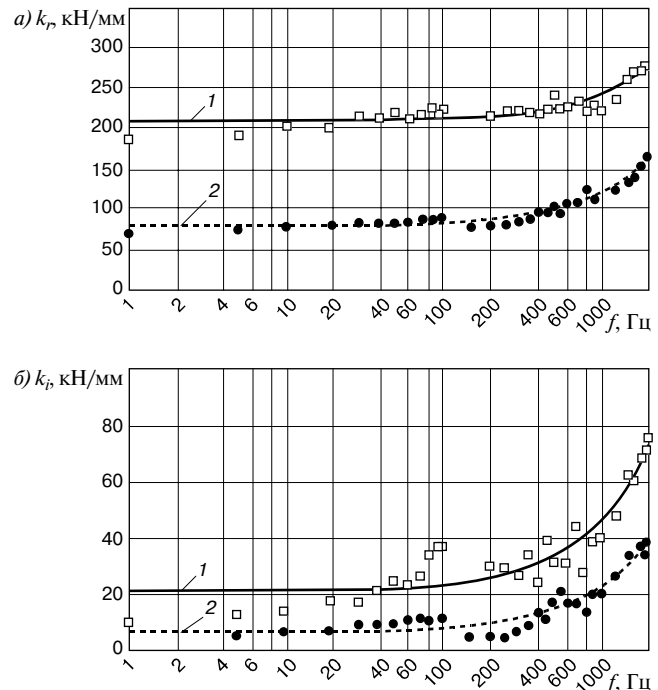


Рис. 7. Динамическая тангенциальная жесткость подкладки при комнатной температуре: обобщенное представление результатов, полученных при динамическом нагружении гармоническими колебаниями низкой и высокой частоты: а — действительная часть; б — мнимая часть; k_r, k_i — жесткости; 1 — предварительная нагрузка 43 кН; 2 — предварительная нагрузка 25 кН

зажмем предварительная нагрузка может снизиться даже до нуля;

- в случае большой амплитуды колебаний нагрузки жесткость резиновой подкладки ниже, чем при малой амплитуде. В связи с этим в моделирующих расчетах для учета воздействий периодических возмущений (некруглостей колес, волнообразного износа) параметры подкладки должны быть адаптированы к колебаниям нагрузки.

Для описания нелинейного поведения подкладки используют расчет, основанный на нелинейной диаграмме нагрузка — деформация, которая соответствует восходящей ветви гистерезисной кривой для частоты нагружения 5 – 40 Гц. В этом случае кривая имеет большую крутизну, чем при чисто квазистатическом нагружении. Следует также учитывать, что даже без нагрузки от колеса подвижного состава на подкладку действует предварительная нагрузка 18 кН,

Результаты измерения комплексной жесткости резиновой подкладки типа Zw 700

Колебания предварительной нагрузки, кН	Комплексная жесткость, кН/мм, для двух значений предварительной нагрузки	
	25 кН	43 кН
25	68	91
1	90	220

создаваемая усилием пружинного рельсового скрепления.

В расчетной модели параллельно нелинейной пружине расположен вязкостный демпфер с эквивалентной константой демпфирования. Эта константа должна определяться на базе мнимой части комплексной эквивалентной жесткости, причем в основе лежит та частота, которая соответствует рассматриваемому диапазону. Зависимость константы от предварительной нагрузки и амплитуды ее колебаний может быть учтена лишь приблизительно и только в особых случаях (например, при перекачивании колес через неровности волнового износа). Таким образом, следует стремиться использовать для расчетов среднюю константу демпфирования во всем диапазоне величин предварительной нагрузки и ее колебаний.

Выводы и проблемы

Механические свойства упругой рельсовой подкладки типа ZW 700 исследованы с помощью лабораторных экспериментов, позволивших также сделать вывод о нелинейном характере ее жесткости.

В то же время остался ряд нерешенных вопросов:

- систематическими исследованиями должны быть определены все свойства применяемых резиновых подкладок, необходимые для нелинейного моделирования, а именно эквивалентные величины жесткости и демпфирования при предварительной нагрузке 25 и 43 кН и амплитуде колебаний нагрузки 25 кН в зависимости от частоты нагружения, динамическая тангенциальная жесткость и соответствующая величина демпфирования как функция предварительной нагрузки и частоты;

- необходимо получение информации о том, какие значения демпфирования являются оптимальными для различных частотных диапазонов;

- в диапазоне частот 40 – 1500 Гц требуются изменения с большими колебаниями нагрузки, что необходимо для изучения процессов перекачивания колес через неровности при волновом износе рельсов;

- для акустических исследований необходимы измерения в диапазоне частот 2 – 5 Гц.

В дополнение к исследованиям упругих подкладок при вертикальном нагружении необходимы результаты измерений, полученные и при горизонтальном нагружении.

K. Knothe. Glasers Annalen, 2002, № 11, S. 496 – 501.

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ТЕХНИКА УПРАВЛЕНИЯ

Общие вопросы. Транспортная политика. Экономика. Социальные вопросы

Инвестиции в железнодорожный транспорт Польши в 1998 – 2005 гг. — *Przegląd Komunikacyjny*, Польша, 2005, № 3, s. 34 – 35, польск.

В графической форме приведены сравнительные данные по объемам и источникам финансирования инвестиций в указанный период. Подробно прокомментирован инвестиционный план на 2005 г. Перечислены крупнейшие железнодорожные проекты, показано распределение средств по источникам финансирования. Ил. 1, табл. 1.

Инвестиции в пассажирский рельсовый транспорт в Северной Америке. — *Railway Age*, США, 2005, № 1, p. 1, англ.

В табличной форме приведены данные по капитальным вложениям в системы рельсового транспорта облегченного типа и метрополитены в 1993 – 2002 гг. Отмечено, в частности, что за указанный период на развитие городского рельсового транспорта ассигновано 17,75 млрд. дол. США, пригородных железных дорог 27,1 млрд., метрополитенов — 9,8 млрд. дол.

Леборнь Г. Железные дороги Германии открыты для конкуренции. — *La Vie du Rail*, Франция, 2005, № 2998, p. 4, фр.

Рассмотрены проблемы предоставления пропускной способности сети железных дорог конкурирующим компаниям-операторам. Отмечено, что в 2004 г. из 8707 заявок на выделение ниток графика не были удовлетворены лишь 76. Проанализирована ситуация в грузовых дальних, региональных и комбинированных перевозках, приведены данные по их объемам. Подчеркнуто, что вследствие конкуренции со стороны автомобильного транспорта тарифы были снижены в среднем на 9 %.

Мартен К. На железных дорогах Украины. — *La Vie du Rail*, Франция, 2005, № 2994, p. 20 – 27, фр.

В форме репортажа о поездке из Киева в Харьков рассказано о качестве сервиса в поездах, состоянии подвижного состава. Приведены сведения о ходе структурной реформы на железных дорогах Украины, ситуации на сети, численности парка вагонов и локомотивов, выполняемых объемах грузовых и пассажирских перевозок, электрификации линий.

Фальши М. Третий пакет документов Европейского парламента по железнодорожному транспорту. — *Le Rail*, Франция, 2005, № 117, p. 19, фр.

Изложена позиция Европейской организации по управлению железнодорожной инфраструктурой (EIM) относительно пробле-