

Инновационные методы снижения уровня шума

За прошедшие десятилетия во всем мире происходило перемещение грузов с железнодорожного транспорта на автомобильный. В совокупности с аналогичным процессом в области пассажирских перевозок это привело к значительному увеличению пробок на дорогах, повышению загрязненности воздуха, усиленному износу автодорожной инфраструктуры, а также к увеличению числа дорожно-транспортных происшествий и связанного с ними ущерба. В последние годы эта тенденция меняется, и с увеличением размеров железнодорожных перевозок (прежде всего грузовых) повышаются требования в отношении защиты населения от шума.

Наряду с более высокой безопасностью железнодорожный транспорт имеет также очевидные преимущества перед другими видами с точки зрения воздействия на окружающую среду:

- высокая эффективность использования энергоресурсов;
- меньшая потребность в занимаемых площадях;
- меньший объем выбросов вредных веществ.

Чтобы еще больше усилить экологические преимущества железнодорожного транспорта, необходимо снизить уровень излучаемого им шума. Это нужно, прежде всего, для того, чтобы вернуть людям, проживающим вблизи от железных дорог, утраченный ими из-за шума качественный уровень жизни или даже повысить его. Предельно допустимые нормы уровня шума изложены в федеральном постановлении BimSchV № 16 о защите окружающей среды от воздействия шума. Речь идет, например, о предельно допустимых нормах шума с 22 до 6 ч утра. Так, в прилегающих к новым высокоскоростным линиям городских микрорайонах они не должны превышать 49 дБ(А), а в сельской местности и зонах смешанной застройки — 54 дБ(А).

В таких же зонах, расположенных рядом с существующими обычными

линиями, эти нормы составляют соответственно 60 и 62 дБ(А).

В частности, в связи с разным распределением частот в спектрах шума от автомобильного и железнодорожного транспорта последний при назначении предельных допустимых норм шума получает так называемую железнодорожную надбавку. На территории Германии она принята равной 5 дБ(А), а в других странах эта надбавка применяется с различными повышающими коэффициентами.

В то же время исследования, проведенные, например, в Японии и Швеции, показывают, что шум от железнодорожного транспорта воспринимается людьми более негативно, чем от автомобильного. Для выполнения требований документа BimSchV № 16 железные дороги Германии (DB) и министерство транспорта страны (BMVBS) издали карту оздоровления в отношении излучаемого шума на сети DB.

Воздействие на человека шума от железной дороги

На человеческий организм действуют следующие, в том числе и субъективные величины звукового давления, представленные в логарифмическом виде:

- предел восприятия (порог слышимости), равный 0 дБ;
- предел различимости изменений уровня звука, равный 3 дБ;
- удвоенное или уменьшенное в 2 раза субъективное восприятие уровня громкости, равное ± 10 дБ.

Звук характеризуется не только амплитудой, выраженной в децибелах, но также и частотой — в герцах. Диапазон частот, воспринимаемых ухом человека, лежит в пределах от 16 Гц примерно до 16 кГц. Максимальная восприимчивость органов слуха человека охватывает диапазон от 1 до 4 кГц.

Шум может негативно влиять на здоровье людей, вызывая следующие медицинские последствия:

- снижение способности к концентрации внимания;
- повышение риска сердечных приступов;
- удвоение вероятности возникновения инфаркта миокарда;
- увеличение риска заболевания лейкемией и раком грудной железы.

Для достижения максимальной эффективности мероприятия по защите от шума должны быть направлены непосредственно на источники шума, т. е. на подвижной состав или путь. Отделение железнодорожного транспорта Технологического института в Карлсруэ (KIT) основное внимание в своих исследованиях уделяет пути, так как он взаимодействует со всеми видами подвижного состава.

Возникновение и распространение шума

На железной дороге имеются разные источники шума, которые излучают его в различных диапазонах скорости движения:

- шум от движения подвижного состава, или шум качения, в диапазоне скорости $50 \text{ км/ч} \leq v \leq 200 \text{ км/ч}$ (шероховатость рельсов и колес, шумоизлучение кузова);

- аэродинамический шум (основание и полз токоприемника, установки кондиционирования воздуха, тележки) при $v \geq 200 \text{ км/ч}$;

- агрегатный шум (вентиляторы, крышевая и подкузовная части установок кондиционирования воздуха) при $v \leq 50 \text{ км/ч}$;

- шум тягового привода и передачи при $v \leq 50 \text{ км/ч}$ (глушитель, диезьель, тяговая передача).

При качении поезда в колесах и рельсах возбуждаются колебания, которые передаются в окружающую среду в виде шума (рис. 1). При скорости движения поездов до 200 км/ч основным источником шума являются зоны контакта колес с рельсами. Важными факторами возникновения шума являются шероховатость колес и рельсов и возбуждение колебаний в отдельных узлах ходовой части подвижного состава и верхнего строения пути.

Какие колебания будут возникать в рельсах и распространяться в виде воздушного шума, зависит в основном от структуры пути. В связи с этим можно в значительной мере воздействовать на уровень шума с помощью мероприятий в отношении конструкции пути.

Шум, излучаемый колесами и рельсами при движении подвижного состава, распространяется практически во всем слышимом диапазоне частот, однако от колес преимущественно воспринимается частота около 2 кГц , а от рельсов — около 1 кГц . Излучение шума зависит также от применяемых типов верхнего строения пути, конструкции мостов и имеющихся устройств для снижения уровня шума.

При определении прогнозируемых параметров шума обычно учитывают лишь усредненный уровень. Пиковые значения, возникающие при отдельных поездках, при

движении подвижного состава с неисправной ходовой частью и т. д. не учитываются.

Кроме того, уровень шума различных поверхностей оценивается по системе Bonus-Malus. Так, для балластного пути с железобетонными шпалами к значению уровня шума добавляется 2 дБ(А) из-за повышенного отражения шума по сравнению с балластным путем на деревянных шпалах. При безбалластном верхнем строении пути независимо от его конструкции к уровню шума добавляется 5 дБ(А) из-за более низкой звукопоглощающей способности бетонной поверхности по сравнению с балластом.

Проект FiL-Rail

Основой исследовательского проекта отделения железнодорожного транспорта КИТ являются запатентованные или заявленные к патентованию шумопоглощающие функциональные элементы железнодорожного пути (FiL-Rail). Основными задачами проекта FiL-Rail являются:

- снижение уровня воздушного шума ($\geq 10 \text{ дБ}$ — более чем в 2 раза) и корпусного ($\geq 35 \text{ дБ}$ — в 100 раз по сравнению с классическим балластным путем);
- понижение стоимости элементов железнодорожного пути и за-

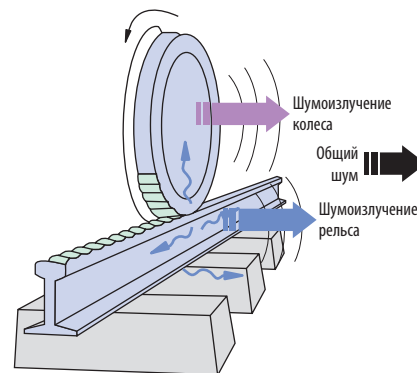


Рис. 1. Возникновение шума качения

трат на его текущее содержание за счет унификации компонентов и ускорения ремонтных и строительных работ.

В целях создания бесшумного пути на жестком основании, эквивалентного по уровню шума пути на щебеночном балласте, исследования не должны ограничиваться только свойствами поверхности, а охватывать всю конструкцию пути. При этом элементы FiL-Rail разрабатывали в сотрудничестве с промышленными предприятиями, а их эффективность проверяли на опытных участках. Обзор современных элементов проекта FiL-Rail представлен в таблице.

Путь тунна FiL-Rail ERS. В качестве примера инновационного бесшумного и устойчивого к вибрации и износу пути можно рассматривать безбалластный путь FiL-Rail ERS

Элементы проекта FiL-Rail

Элемент	Модификации
FiL-Rail ERS (утопленный путь на жестком основании)	С низким уровнем вибрации основания; с низким износом
FiL-Rail MSW (низкая шумозащитная стенка)	На балластном пути; на пути ERS
FiL-Rail Diffusor (поглотитель воздушного шума)	
FiL-Rail LN Bridge (мост с низким уровнем шума)	С верхним строением пути ERS; с конструкцией типа SLEP
FiL-Rail EcoTrack (экологичный путь)	С верхним строением пути ERS; на балласте
FiL-Rail Detection (система регистрации вибраций)	Подсистемы: EWS-Transport; автоматический мониторинг; контроль
FiL-Rail Energy	В разработке

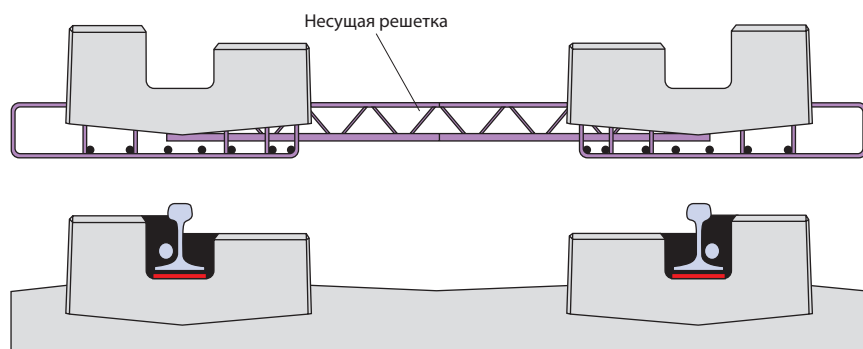


Рис. 2. Поперечный разрез пути конструкции FiL-Rail ERS

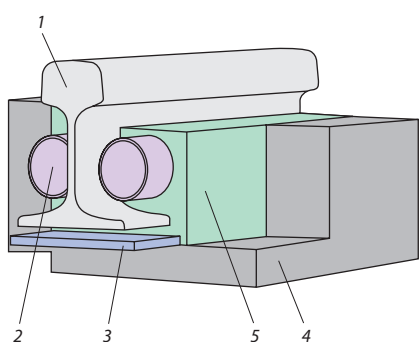


Рис. 3. Шумоизоляция рельса в системе FiL-Rail ERS:

1 — рельс любого профиля; 2 — труба (может служить кабельным каналом и позволяет экономить пробковый изоляционный материал); 3 — упругая подкладка; 4 — бетон; 5 — шумоизолирующая пробковая смесь (обеспечивает равномерно упругое опирание рельса в вертикальном и горизонтальном направлениях)

(рис. 2, 3) компании edilon) (sedra). Путь этой конструкции имеет фирменное обозначение Infundo HR®. В его разработке отделение железнодорожного транспорта института КИТ принимало участие в течение нескольких лет.

При разработке пути FiL-Rail ERS ориентировались в основном на снижение уровня корпусного шума. Измерения показывают, что снижение суммарного уровня шума достигает 20 дБ, что соответствует снижению корпусного шума в 10 раз по сравнению с путем на щебеночном основании. В качестве дальнейшего шага поставлена цель на снижение корпусного шума более чем на 35 дБ по сравнению

с путем на щебеночном основании и по созданию недорогой системы масса — пружина из стандартизованных элементов с помощью таких мер, как, например, глубина заделки рельсов или дополнительная упругая подкладка.

С другой стороны, FiL-Rail ERS оказывает также большое влияние на уровень воздушного шума. Как показывают результаты измерений (рис. 4), уровень шума у пути на щебеночном основании имеет пиковое значение при частоте порядка 2000 Гц, а у безбалластного пути типа FiL-Rail ERS за счет упругой заделки рельсов это пиковое значение смещается на 1400 Гц в сторону более низких частот, а именно до частоты порядка 600 Гц. При этом пиковое значение звукового давления у безбалластного пути FiL-Rail ERS выше, чем у пути на щебеночном основании, однако этот пик находится вне частотного диапазона, где чувствительность человека особо высокая.

Излучение шума в высокочастотном диапазоне повышенной восприимчивости (>1000 Гц) снижается на 8 дБ по сравнению с путем на балласте. Непрерывная упругая заделка рельсов обеспечивает также дополнительные позитивные эффекты:

- значительное снижение затухания звуковых частот;
- особо гладкая поверхность катания рельсов;
- сниженный износ рельсов по сравнению с путем на щебеночном

основании или с безбалластным путем прежних конструкций.

Стенка типа FiL-Rail MSW. Шумозащитные стенки служат для снижения уровня воздушного шума. Они могут иметь традиционное исполнение (высота до 2 м над УГР), но применяются также стенки уменьшенной (76 см) и минимальной (38 см) высоты.

Они устанавливаются вне зоны габарита приближения строений на расстоянии a от оси пути. При этом соблюдаются следующие соотношения:

- $h_{\max} > 76 \text{ см}$ над УГР при $a_{\min} \geq 3,3 \text{ м}$;
- $38 \text{ см} \leq h_{\max} \leq 76 \text{ см}$ при $a_{\min} \geq 1,7 \text{ м}$;
- $h_{\max} = 76 \text{ см}$ при $a_{\min} \geq 1,6 \text{ м}$.

Шумозащитная эффективность стенки зависит от ее геометрии, материала и структуры поверхности.

На основании ряда требований, в том числе о необходимости снижения уровня шума вблизи от его источника, было принято решение о максимальной высоте шумозащитной стенки FiL-Rail MSW, равной $h_{\max} \leq 38 \text{ см}$ над УГР.

Геометрия FiL-Rail MSW рассчитана таким образом, чтобы она по отражению излучаемого шума была по меньшей мере эквивалентна стандартной шумозащитной стенке высотой 2 м (рис. 5).

Для достижения оптимального снижения шума стенка MSW должна обладать также определенными акустическими параметрами. При этом следует учитывать характерный спектр частот шума от колес и рельсов, например в зависимости от способа укладки рельсов, и акустические характеристики компонентов пути, например междурельсового пространства. Акустические параметры стенок FiL-Rail MSW, разрабатываемых в настоящее время, определяют по трем основным направлениям.

Отражение. Звукопоглощающие защитные стенки имеют обычно несплошную поверхность (с разрывами, просветами). Необходимая для жесткости доля сплошной

поверхности, как правило, больше 50%. От этой поверхности происходит отражение приходящего шумоизлучения. В конструкции FiL-Rail MSW звуковые лучи фокусируются вогнутой поверхностью стенки MSW и отражаются ею на так называемую первичную фокальную линию, роль которой на балластном пути исполняет поверхность балластной призмы, заключенная между торцом шпалы и стенкой MSW. Оставшиеся непоглощенными звуковые волны, прежде чем выйти в окружающее пространство, подвергаются дальнейшему ослаблению в результате многократного отражения.

Поглощение. Часть непоглощенных звуковых волн попадает на стенку FiL-Rail MSW и поглощается там (по меньшей мере, в частотном диапазоне повышенной восприимчивости). В качестве поглотителей наряду с известными пористыми материалами испытываются вибрационные мембраны, которые за счет трения преобразуют звуковые волны в тепло, и акустические резонаторы.

Эхо. При испытаниях стенки FiL-Rail MSW исследовали процесс отражения ею звуковых волн, исходящих от шеек рельсов. Поскольку оба элемента лежат в параллельных плоскостях и на очень коротком расстоянии друг от друга, звук здесь должен во многих частотных диапазонах уничтожаться эхом в результате деструктивной интерференции.

После предварительных исследований с помощью специальной программы для расчета уровня шума были проведены первые испытания с отражающей стенкой облегченной конструкции FiL-Rail MSW, эквивалентные результатам, полученным с помощью стандартной шумозащитной стенки высотой 2 м.

Основная цель, заключающаяся в снижении уровня воздушного

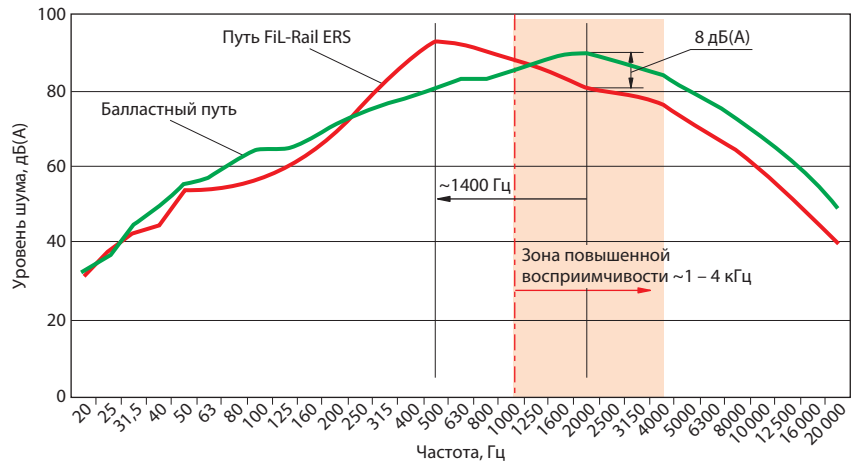


Рис. 4. Сравнение уровней шума, создаваемого прохождением грузового поезда по пути FiL-Rail и по балластному пути

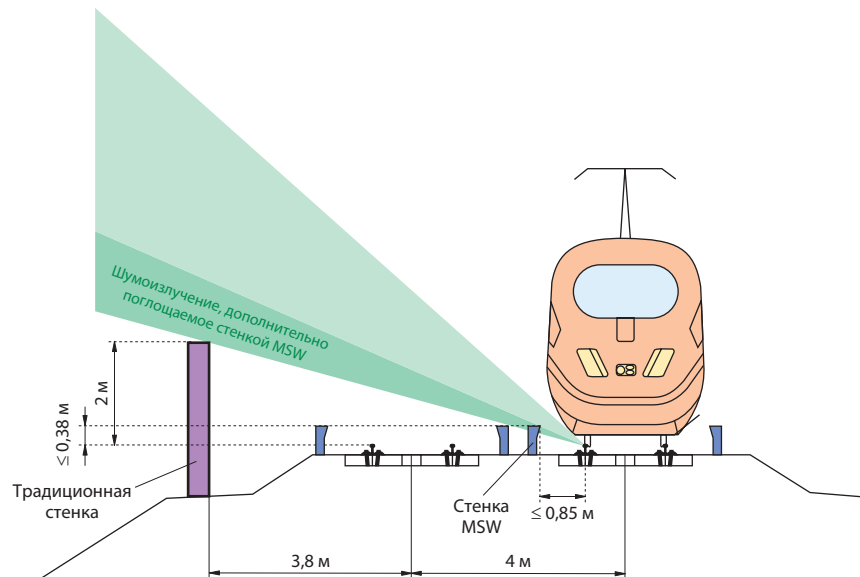


Рис. 5. Сравнение шумозащитного действия традиционной стенки и стенки MSW

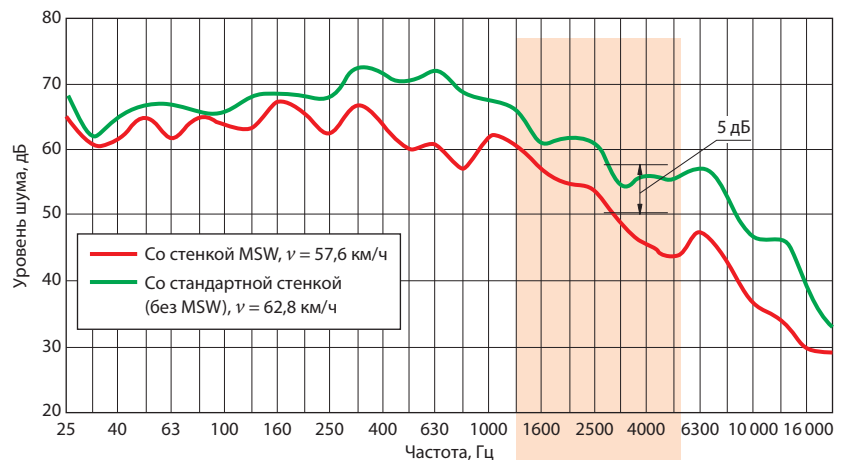


Рис. 6. Сравнение уровней шума при использовании стандартной шумозащитной стенки и MSW

шума на магистральных железных дорогах, должна быть достигнута за счет:

- звукоотражения $FiL-Rail\ MSW_{reflekt}$ способствующего снижению на 5 дБ;
- звукопоглощения $FiL-Rail\ MSW_{absorb}$ с ожидаемым снижением не менее 7 дБ;
- активного поглощения шума с помощью модификации стенки $FiL-Rail\ MSW_{aktiv}$ (ожидаемое снижение 10 дБ);
- применения модификации стенки $FiL-Rail\ MSW^+$ общей высотой менее 20 см (ожидаемое снижение >10 дБ).

FiL-Rail Diffusor. Звукопоглощающие диффузоры являются шумопоглотителями, расположенными между рельсами и сбоку от них за пределами габарита приближения строений, и служат исключительно для снижения уровня воздушного шума (рис. 7). Они могут устанавливаться в сочетании со стенкой $FiL-Rail\ MSW$ как на балластном, так и на безбалластном пути. Основные требования предъявляются в отношении:

- статики и динамики;
- безопасности персонала, надежности в эксплуатации;
- текущего содержания пути.

Геометрические и статические параметры звукопоглощающего диффузора $FiL-Rail\ Diffusor$ должны отвечать следующим требованиям:

- возможность типовой стандартизации;
- наличие минимального свободного пространства с обеих сторон от рельсов;

- простота монтажа и демонтажа;
- возможность контроля при обходе.

Для оптимального снижения уровня шума звукопоглощающий диффузор должен обладать определенными акустическими характеристиками. При этом следует принимать в расчет те же спектры частот, что и при определении параметров стенки $FiL-Rail\ MSW$.

Акустические элементы звукопоглощающих диффузоров, находящихся в настоящее время в стадии разработки, состоят из двух частей, обеспечивающих отражение шума и поглощение.

Поглотители звука имеют, как правило, пористую поверхность, которая поглощает попадающие на нее звуковые волны. Звукопоглощающий диффузор $FiL-Rail$ имеет твердую поверхность с отверстиями. Необходимая для статики твердая часть поверхности должна по возможности составлять <50%. Звуковые волны, попадающие на эту поверхность, отражаются. Из-за динамики поезда эти звуковые волны гасятся в результате многократного отражения в нижней части движущегося поезда.

Часть звукового излучения, которая через отверстия в поверхности попадает в диффузор, поглощается там, по крайней мере в пределах диапазона наибольшей слуховой восприимчивости. В качестве поглотителя здесь испытываются такие же материалы, как и у стенок $FiL-Rail\ MSW$.

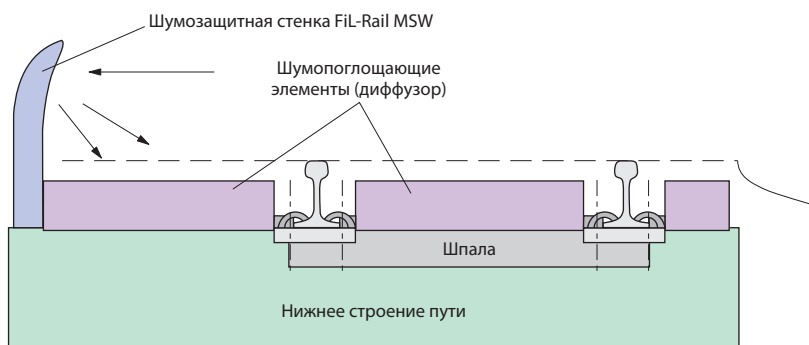


Рис. 7. Сочетание поглощающего диффузора с шумозащитной стенкой $FiL-Rail\ MSW$

Мосты FiL-Rail низкого уровня шума. На сети DB в настоящее время имеется около 31,5 тыс. мостов различной конструкции (арочные, стальные, железобетонные, из предварительно напряженного бетона, с фермами из профилированной стали, комбинированные), 14,1 тыс. из которых имеют возраст более 60 лет и примерно 11,3 тыс. — более 90 лет. В связи с этим на мостах нередко приходится проводить не только ремонтные работы по текущему содержанию мостового строения пути, но также и дополнительные работы по снижению уровня шума. Реконструкция моста приводит к значительным ограничениям движения и связана с большими расходами, поэтому зачастую более целесообразным решением является снос старого моста и строительство нового.

Строительство нового моста также требует больших затрат времени и средств в связи с необходимостью индивидуального проектирования и расчета. Для крупных мостовых сооружений это оправданно. Более 80% мостов в Германии имеют длину до 20 м, тем не менее при реконструкции их приходится проектировать заново. Для того чтобы сделать этот процесс более рациональным, в рамках исследовательского проекта F&E, инициированного федеральным министерством экономики, была предпринята разработка мостового строения пути с низким уровнем шума $FiL-Rail\ SLEP-Bridge$. Цели проекта следующие:

- уменьшение строительной высоты конструкции;
- снижение сроков и уменьшение стоимости изготовления за счет стандартизации компонентов и применения модульного принципа.

Конструкция $FiL-Rail\ SLEP-Bridge$ для каждого пути состоит из трех частей (рис. 8), которые устанавливают на новых или реконструированных опорах и соединяют между собой, — это основная плита с интегрированным путем

типа FiL-Rail ERS и два консольных элемента.

Для расчета параметров (статистических и акустических) размеры моста вводятся в программу и гибко комбинируются с данными, вытекающими из конкретных требований. За счет отсутствия щебеночного балластного слоя уменьшается строительная высота мостового строения пути. Независимо от конструкции и благодаря непрерывному опиранию рельсов снижается уровень излучаемого шума. При выборе поперечных сечений плит учитываются технология их изготовления, способ транспортировки, срок службы и эксплуатационные качества. С использованием предварительно изготовленных конструкций ремонт мостов на существующих линиях может производиться в более короткие технологические окна.

FiL-Rail EcoTrack. Для оптимизации верхнего строения пути с точки зрения воздушного шума производится большое число измерений и расчетов, которые подтверждают, что характер поверхности пути оказывает большое влияние на поглощение звука и, следовательно, на излучение шума. Акустическая оптимизация поверхности пути является поэтому важным условием эффективного снижения уровня шума.

В пространстве между нижней частью кузова вагонов и поверхностью пути (например, FiL-Rail ERS), а также между защитной стенкой FiL-Rail MSW и поверхностью пути происходит многократное отражение звука. Интенсивность воздушного шума, излучаемого железнодорожным путем и подвижным составом, снижается в результате поглощения звука покрытием пути при каждом отражении.

Использование не требующего большого ухода растительного покрова в междурельсовом пространстве и междупутье, разработанного и испытанного в сотрудничестве

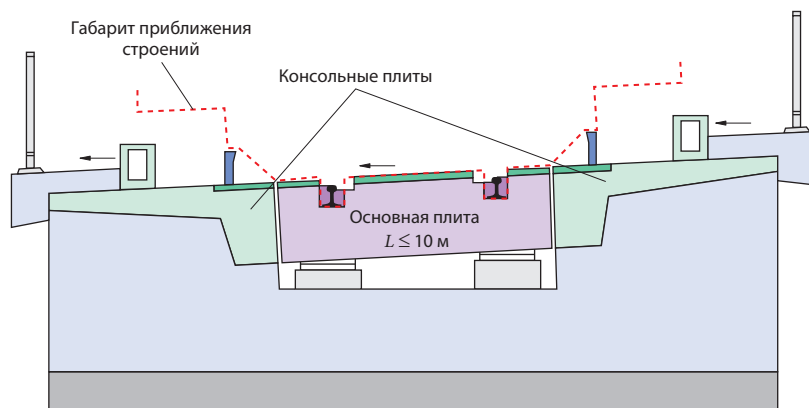


Рис. 8. Конструкция мостового строения пути FiL-Rail SLEP-Bridge

с университетом Гумбольдта (Берлин), дает целый ряд положительных эффектов, которые способны повысить экологические преимущества железных дорог:

- значительно усиливается поглощение звука в непосредственной близости от его источника по сравнению с бетонной поверхностью;
- в условиях города улучшается микроклимат за счет создания новых озелененных площадей;
- обеспечиваются эстетические преимущества перед обычным путем.

До сих пор озелененный путь с успехом использовался для трамвайных линий. Реализация этой концепции на железнодорожных магистралях со скоростью движения до 160 км/ч требует применения растительности, рассчитанной на повышенные нагрузки, обладающей выносливостью и способной прочно укрепляться на железнодорожном пути.

FiL-Rail Detection. Система FiL-Rail Detection позволит с помощью датчиков измерять вибрацию компонентов пути. В рамках проекта F&E планируется проведение следующих расчетов на модели:

- на предварительной стадии будут фиксировать колебания пути, возбуждаемые землетрясением, а также менее мощными факторами, вплоть до человеческих шагов, передавать предупреждения об опасном

уровне вибраций на центральный пульт управления. Тем самым в зоне обслуживания может быть снижен объем возможных последствий природных катаклизмов за счет остановки поездов, подвергающихся опасности, отключения электрических и газовых установок и т. д.;

- на основной стадии планируется минимизировать опасность путем передачи сообщений в кабину машиниста (снижение скорости, запрет остановки на мостах или под порталом тоннеля);

- на заключительной стадии будет разработана система автоматического контроля, передающая спасательным службам информацию о конкретных поврежденных объектах.

Перспективы и выводы

Элемент железнодорожной инфраструктуры FiL-Rail Energy находится в процессе разработки.

На конструкцию пути FiL-Rail ERS получен допуск Федерального бюро железных дорог Германии (EBA), допуск на мостовое строение пути FiL-Rail SLEP-Bridge находится в стадии оформления.

По материалам института KIT в Карлсруэ (www.eisenbahn.ise.kit.edu); компании edilon) (sedra (www.edilonsedra.com); Eisenbahningenieur, 2010, № 10, S. 22–29.