

Виброизоляция тоннеля на новой линии Цюрих — Тальвиль

В Швейцарии двухпутная линия Цюрих — Тальвиль, построенная в рамках программы Bahn 2000 и введенная в эксплуатацию в июне 2003 г., имеет общую длину 10,7 км. Основная ее часть проходит в тоннеле длиной 9,4 км. Концевые участки тоннеля расположены под жилыми и офисными зданиями, стоящими на достаточно рыхлых горных породах, толщина слоя которых невелика. С целью ограничения вибраций и распространения корпусного шума на двухпутном участке линии длиной около 2 км потребовалось выполнить конструкцию с использованием опорных плит по системе масса — пружина. Контрольные измерения подтвердили правильность такого решения.

О проекте тоннеля

Для технического оснащения тоннеля на линии Цюрих — Тальвиль (рис. 1, 2) инженерная компания ZIMBA, являющаяся генеральным проектировщиком Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) и включающая в себя фирмы Basler & Hofmann, SNZ, SEIB, Baier+Büchler, Furrer+Frey, Rutishauser и BÄR, провела функциональный тендер (с заданной программой производства работ).

Инженерное бюро Rutishauser разработало проект строительства и каталог требований к опорным плитам для безбалластного пути, выполненного по системе масса — пружина (MFS).

Право на выполнение проекта и оснащение всей железнодорожной техникой получил генеральный подрядчик консорциум ARGE ZITECH, в который входят компании Walo Bertschinger (ведущая фирма), TBF+Partner, Paul Keller Ingenieurbüro, Grunder

Ingenieurbüro, Sigwel, Heierli-Marchand, Sersa, Furrer+Frey, Baumeler Leitungsbau, Kaufmann и австрийское отделение компании Siemens. Детальное проектирование опорных плит, а также системы защиты от вибраций выполняла инженерная компания Heierli-Marchand (отделение компании Heierli).

Монтаж всей железнодорожной техники согласно договору требовалось закончить за полгода до срока завершения проекта, согласованного первоначально.

Особенности системы масса — пружина

Эта система ранее применялась в различных конфигурациях. Настоящий проект имел несколько особенностей:

- бесшовная конструкция плиты с рекордной длиной 1,5 и 0,5 км — первая на магистральной железнодорожной линии;
- устройство съездов в кривых с большим возвышением наружного рельса при тяжелом варианте системы MFS;
- укладка опорных плит тяжелой MFS с точечным опиранием: их бетонирование на подготовленном плоском основании; параллельный подъем отрезками длиной по 95 м с помощью гидравлических прессов;



Рис. 1. Портал тоннеля со стороны станции Цюрих-Главный



Рис. 2. Портал тоннеля на станции Тальвиль

втягивание опоры с помощью специального троса; заливка армированных поперечных стыков;

- экономия, достигаемая при использовании MFS средней мощности с опиранием на подготовленные поверхности: замена части дорогих матов в основании и по бокам равномерно распределенными матами из минерального волокна без заметного снижения качества;

- применение новых стрелочных переводов для жесткого основания пути и системы масса — пружина: впервые использованная на сети SBB конструкция с тяжелыми моноблочными шпалами на резиновых подкладках.

Инновационное жесткое основание пути

Обычно на SBB путь в тоннеле уложен без балласта на жесткое основание. Такой путь рассчитан на интенсивные смешанные перевозки: скорость движения на конечных участках тоннеля достигает 200 км/ч, а на большей части участков, где применена система MFS, она равна 80–125 км/ч.

По предложению компании ARGE ZITECH в рельсошпальной решетке использовали усовершенствованную систему двухблочных шпал типа LVT, примененную в свое время в Евротоннеле. Между блоками шпал отсутствуют поперечные соединительные штанги (стяжки), при этом блоки несколько заглублены в бетонную плиту.

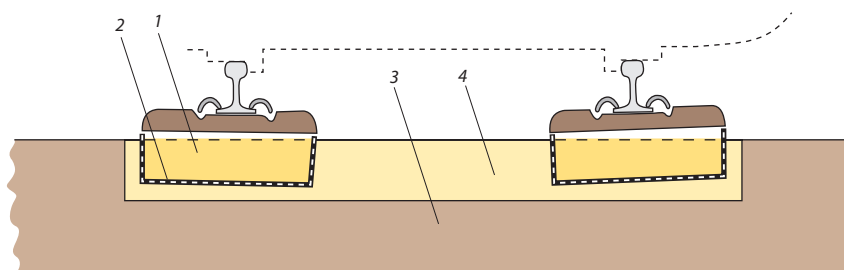


Рис. 3. Безбалластный путь системы LVT:

1 — блок шпалы без соединительной стяжки; 2 — резиновая подошва шпалы; 3 — опорная плита (при безбалластном пути не армирована, при системе MFS армирована); 4 — заливочный бетон (неармированный)

За исключением зоны стрелочных переводов опорные плиты в безбалластном пути не имеют арматуры: в них на определенном расстоянии друг от друга расположены пазы. Это делает экономичными изготовление и ремонт плит. В шпальное корыто опорной плиты (рис. 3) заливали мелкозернистый бетон.

По предложению ARGE ZITECH все восемь стрелочных переводов с подвижным сердечником крестовины при жестком основании пути впервые на SBB уложили на моноблочные шпалы с резиновой подошвой (вместо двухблочных шпал типа LVT). Шпалы и электромеханическое оборудование стрелочных переводов расположили в шпальных лотках опорных плит. После монтажа и выправки стрелочных переводов, а также сооружения опалубки для выемки, в которой размещается стрелочное оборудование, шпальный лоток заполняли неармированным мелкозернистым бетоном.

Проектирование защиты от вибраций

Продольный разрез тоннеля приведен на рис. 4. Рыхлые горные породы лишь незначительно перекрывают его в нескольких местах. Фундаменты офисных зданий, расположенные над ним, почти соприкасаются с телом тоннеля.

Вне тоннеля необходимое подавление вибраций обеспечено укладкой подбалластных матов. Опорные плиты пути имеют конструкцию системы MFS; общая длина их со стороны портала в Цюрихе составляет 1500 м, а со стороны Тальвиля — около 560 м.

На основе проекта строительства, предложенного инженерным бюро Rutishauser, в ходе торгов были временно определены протяженность участков, а также требования к мероприятиям по защите от вибраций и вторичной защите от шума. Качество неотделанного тоннеля проверяли, осуществляя так называемое вибростанирование: с помощью мощного вибратора в тоннеле

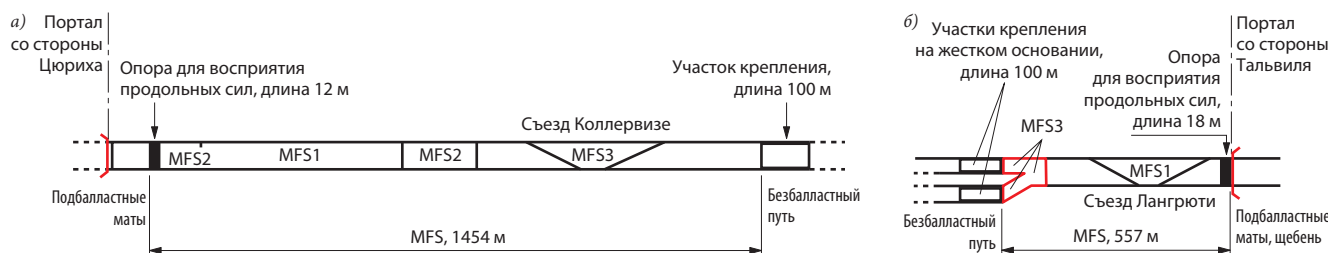


Рис. 4. Продольный разрез тоннеля: а — участок со стороны Цюриха; б — участок со стороны Тальвиля

генерировали колебания частотой 10–120 Гц и с помощью измерения уровней распространившихся колебаний определяли их воздействие на выбранные здания, расположенные над тоннелем. С учетом затрат и полученного эффекта было решено увеличить длину отрезков внутри тоннеля, на которых реализована система MFS.

Установлены три следующие ступени качества MFS по верхней границе первой гармонической составляющей собственных колебаний системы:

- для MFS1 — $f_1 \leq 8$ Гц (высокие требования);
- для MFS2 — $f_1 \leq 18$ Гц (средние требования);
- для MFS3 — $f_1 \leq 24$ Гц (низкие требования).

Величина f_1 — это первая гармоника собственных колебаний системы в ненагруженном состоянии.

От требований к мощности изоляции MFS отказались, так как точно определить ее невозможно.

В зонах входа в тоннель в Цюрихе и Тальвиле, где перекрытие рыхлыми горными породами минимально, предусмотрены отрезки MFS на упругих одиночных опорах (MFS1). Наряду с защитой от вторичного воздушного шума здесь потребовалось и подавление вибраций. При увеличении толщины перекрытия оказалось достаточным менее затратное опирание плит пути на плоские упругие маты (MFS2, MFS3).

Бесшовная конструкция MFS на участках с точечным упругим опиранием и значительным местным поперечным уклоном позволила получить стабильное и долговечное верхнее строение пути, требующее минимального технического обслуживания.

При отказе от сплошного продольного закрепления в рамках системы MFS обеих длинных железобетонных балок (армированный бетон) их концы потребовалось зафиксировать с учетом воздействия больших сил сдвига, обусловленных

усадкой бетона и колебаниями температуры, а также тормозных сил, передающихся на подошву тоннеля. В противном случае уменьшение длины балок вследствие усадки бетона и ее увеличение, вызванное ростом температуры, были бы слишком большими. В связи с этим на порталных участках тоннеля в Цюрихе и Тальвиле с балластным путем и подбалластными матами потребовалось устройство опор, воспринимающих продольные усилия и не имеющих шумопроводящих мостиков, способствующих распространению корпусного шума. В расположенных внутри тоннеля зонах перехода от балластного пути к безбалластному требования по защите от вибраций не выполнялись.

В двухпутном тоннеле для каждого из путей следовало предусмотреть отдельные системы масса — пружина с проходом шириной 0,6 м в междупутье, а также два съезда (с системами MFS1 и MFS3) и участок расширенного сечения (с системой MFS3) со стороны Тальвиля. На всех этих участках необходимо было стабилизировать опорные плиты в поперечном направлении. Для этого на определенном расстоянии друг от друга укладывали соответствующие боковые опоры, также не имеющие шумопроводящих мостиков, способствующих распространению корпусного шума.

Продольные переходы между MFS различного исполнения должны были отвечать соответствующим предписаниям в отношении эпюры прогиба при проследовании поезда. На переходных участках требовалось обеспечить опирание плит с упругостью, меняющейся двумя ступенями, что достигалось укороченными расстояниями между опорами (MFS1) и переменной жесткостью матов (системы MFS2 и MFS3).

При разработке конструкции пути необходимо было гарантировать постоянный отвод собирающейся на поверхности воды и защитой от грубых загрязнений всех уп-

ругих опор и матов. В связи с этим отдельные упругие опоры укладывали на предварительно подготовленные приливы.

Концепция системы масса — пружина, метод изготовления

Конструкторское исполнение системы масса — пружина подразделяется на три основных типа, различающихся в зависимости от типа тоннеля. Здесь имеются: участок круглого сечения, выполненный методом горной проходки; участки прямоугольного сечения, пройденные открытым способом; короткие однопутные участки и отрезки расширенного сечения со стороны Тальвиля, а также места расположения съездов.

Для изготовления и укладки упругих опор и матов была детально разработана и реализована концепция обеспечения качества. Она включает важные статические и динамические испытания, выполненные перед началом серийного изготовления, контроль серийной продукции и выборочные испытания при укладке.

MFS со сплошным опиранием на упругие маты

На двухпутном участке тоннеля круглого сечения, выполненном методом горной проходки (рис. 5), толщина бетонной опорной плиты составляет 0,5 м. Основанием пути являлся гидравлически связанный несущий слой толщиной около 0,2 м из неармированного бетона и уплотненного гравия. В качестве нижних и боковых были выбраны эластомерные маты USM 2020 и USM 4010, разработанные и изготовленные компанией ContiTech. На нижней стороне они имеют растровую сетку из усеченных конусов. Маты обладают достаточным резервом несущей способности, причем их жесткость возрастает под нагрузкой. Последнее обстоятельство позволило 40% этих матов заменить более де-

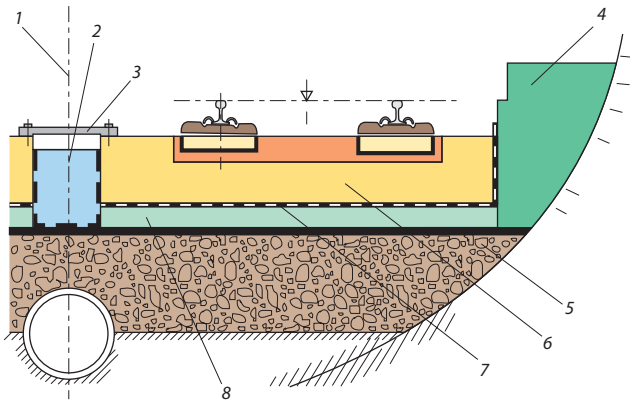


Рис. 5. Фрагмент сечения двухпутного тоннеля с системой MFS2:
 1 — ось междупутья; 2 — центральная опора в междупутье;
 3 — деревянный настил для прохода; 4 — боковой мат;
 5 — гидравлически связанный слой; 6 — подшпальная армированная плита; 7 — нижний мат; 8 — заполняющий бетон (без армирования)

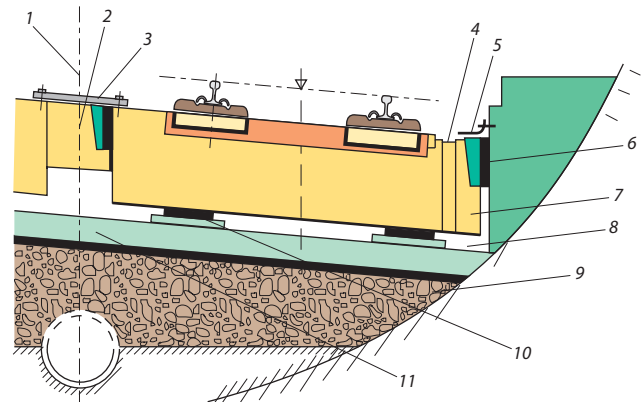


Рис. 6. Конструкция пути с системой MFS1 в двухпутном тоннеле:
 1 — ось междупутья; 2 — бетонная консоль центральной опоры;
 3 — деревянный настил; 4 — желоб для стекания воды; 5 — изоляция зазора; 6 — боковая опора; 7 — подшпальная армированная плита; 8 — дренажная полость; 9 — гидравлически связанный слой; 10 — вертикальная опора (Sylyodyn); 11 — заполняющий бетон (без армирования)

шевыми из минерального волокна производства компании Flumgoc ESSO. Жесткость матов вследствие их специфической реакции на действие эксплуатационных нагрузок по сравнению с жесткостью балласта пренебрежимо мала.

Участки с системой MFS3 (заданное значение $f_1 \leq 24$ Гц) с точки зрения строительства аналогичны участку с MFS2 горной проходки ($f_1 \leq 18$ Гц), так как в обоих случаях минимальная толщина опорных плит оказалась достаточной.

MFS на отдельных опорах

В двухпутном тоннеле со стороны Цюриха (рис. 6) применена система MFS1 на отдельных опорах. Возвышение наружного рельса в кривых здесь достигает 130 мм.

Материал вертикальных упругих опор — высококачественный полиуретан с длительным сроком службы (Sylyodyn NF) производства компании Getzner. Расстояние между соседними опорами в продольном направлении составляет 2,8 м.

Отрезки опорной плиты длиной по 95 м бетонировали непосредственно на фундаментной плите (или на монолитном бетоне при гравийном балласте), затем приподняли с помощью гидравлических

прессов и в образовавшийся зазор вдвигали упругую опору. После опускания плит на опоры проводили окончательную заливку поперечных стыков вместе с соединениями арматурных стержней. В кривых необходимо было обеспечить надежную защиту опорных плит от бокового сдвига (рис. 7).

Все основные операции перед выполнением отработывали и оптимизировали на модели в масштабе 1:1. При этом проверяли различные возможности для изоляции бетонированной плиты от основания, а также отработывали технологию вдвигания вертикальной опоры массой около 50 кг с помощью троса, предварительно уложенного в бетон.

При эксплуатации возможен доступ к встроенным вертикальным опорам из прохода между путями (участок со стороны Цюриха) и через регулярно расположенные вырезы (со стороны Тальвиля). В случае необходимости возможна замена вертикальных опор. Необходимый для этого подъем опорной плиты осуществляется с помощью гидравлических прессов.

Расположенные на определенном расстоянии друг от друга боковые опоры установлены в доступные снаружи зазоры между опорной плитой и фермой и зафиксированы

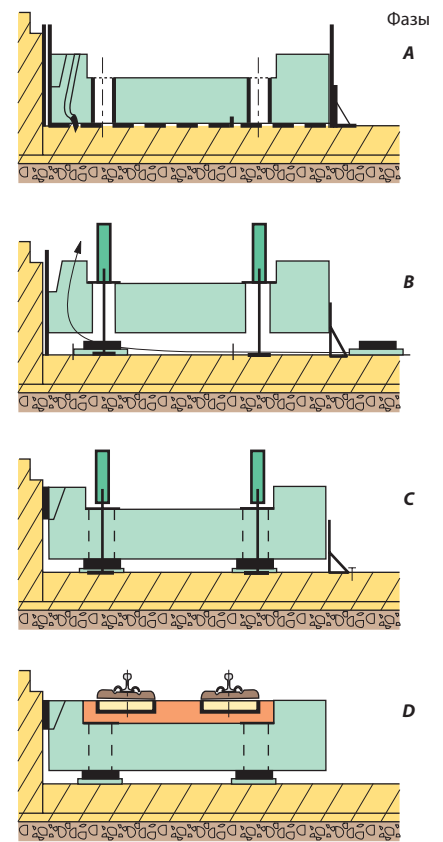


Рис. 7. Этапы изготовления плиты системы MFS1:

А — изготовление опалубки, бетонирование на фундаментной плите; В — подъем подшпальной плиты, вдвигание вертикальной опоры; С — опускание плиты на вертикальные опоры, монтаж боковой опоры, заливка раствора в зазоры; D — монтаж пути, заливка мелкодисперсного бетона в шпальный лоток

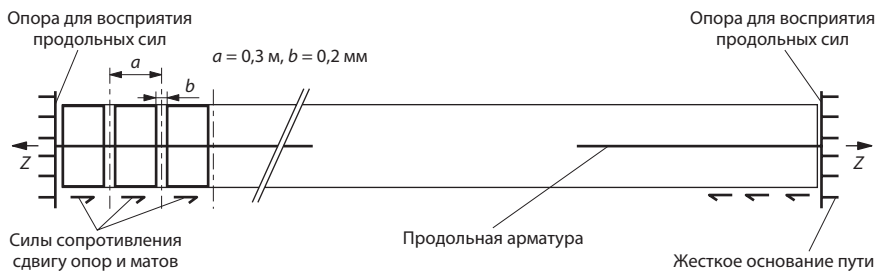


Рис. 8. Бесшовная балка системы MFS

деревянными клиньями. Они выполнены из того же материала, что и вертикальные, в качестве наполнителя использован твердый материал. Чтобы препятствовать скольжению опорных поверхностей в эксплуатации и их ускоренному износу, применяют их заклинивание или предварительное сжатие боковых опор.

В области стрелочного перевода со стороны Тальвиля опорная плита выполнена в виде системы MFS1, причем укладка арматуры выполнялась в стесненных пространственных условиях. Система MFS здесь не имеет среднего прохода. При остром дефиците времени по ней осуществлялась подвозка материалов для выполнения отделочных и монтажных работ в тоннеле.

В процессе подъема опорной плиты длиной 95 м гидравлические прессы устанавливают в круглых вырезах плиты на расстоянии 5,6 м друг от друга. Основания прессов опираются на монолитный бетон.

Бесшовная конструкция MFS

При фиксированных концах балок в системе MFS и специально предусмотренных распределенных

зазорах в железобетоне (рис. 8) все элементы системы остаются в основном пространственно фиксированными. Минимальный объем работ по уходу за продольной арматурой и улучшение условий ее работы обеспечиваются тем, что усадочные и температурные зазоры в опорной плите имеют малую ширину и равномерное распределение.

Опоры, воспринимающие продольные силы

Эти опоры (рис. 9) устанавливают в местах перехода от системы масса — пружина к пути на щебеночном балласте. Опора длиной 12 м состоит из 12 поперечных ребер, которые с помощью дюбелей закреплены в фундаментной плите подошвы тоннеля, выполненного открытым способом. Поверхности контакта между ребрами и лежащей на них скользящей бетонной плитой облицованы упругими матами (материал Sylomer компании Getzner), благодаря чему шумопроводящие мостики полностью устраняются.

Продольные растягивающие силы в примыкающей бесшовной MFS-балке, обусловленные усадкой бето-

на и температурными сжатиями, — основная нагрузка на опоры. Эти силы передаются на торцы поперечных ребер как сжимающие. Прочность на сжатие матов по торцам ребер (материал Syldodyn V25 компании Getzner) рассчитывали исходя из длительной нагрузки от сил усадки бетона.

Чтобы гарантировать непрерывный переход жесткого основания к балластному верхнему строению пути с подбалластными матами, были применены массивные моноблочные шпалы, рельсы с контррельсами и осуществлено связывание щебеночного балласта.

Продольные силы по концам обеих MFS-балок участка тоннеля, выполненного методом горной проходки, передаются на переходные армированные участки безбалластного пути длиной по 100 м благодаря трению между балластной подушкой и подошвой тоннеля. За этими участками следует обычный безбалластный путь из неармированных плит.

Контрольные измерения в системе масса — пружина

В условиях тендера были предварительно оговорены вид и число шаблонов для измерения профилей тоннеля, необходимых в рамках приемки. Детальная разработка процесса и методов измерений, их проведение и составление доклада о результатах были вменены в обязанности консорциума ARGE ZITECH.

Статические просадки пути. Минимум в двух местах различных отрезков системы MFS и в переходах между ними измеряли статические просадки пути при определенной осевой нагрузке. Результаты имели отклонения от прогнозируемых менее чем на 10%.

Частота собственных колебаний системы. Значения первой гармонической собственных колебаний были измерены при естественном возбуждении грунта, вызывавшем виб-

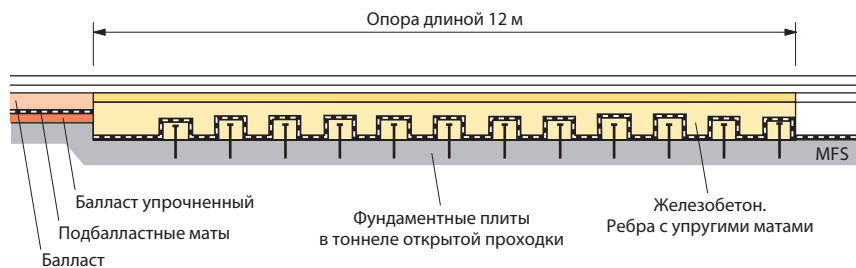


Рис. 9. Упругая опора, воспринимающая продольные усилия в местах перехода к балластному пути

рации оболочки тоннеля или фундаментной опоры системы MFS. Ее уровни были определены в точках упругого опирания плиты, в которых возникало подобное резонансу усиление амплитуды колебаний. В результате измерений получены спектры частот (амплитудные значения) на опорной плите (рис. 10, а) и боковой ферме, связанной с оболочкой тоннеля (рис. 10, б).

Спектр относительных частот, характеризующий коэффициент усиления колебаний и рассчитанный по результатам обоим одновременно проводившихся измерений (рис. 10, в), показывает, что частота $f_1 = 17,2$ Гц. Однозначно величину f_1 из спектра частот колебания опорной плиты определить нельзя.

В качестве контрольных были проведены измерения амплитуды колебаний опорной плиты при импульсном возбуждении. Для этого измеряли частоту колебаний плиты, возникавших, когда на нее с определенной высоты прыгал человек. При этом доминировала частота 19,1, а не 17,2 Гц.

Сравнение результатов измерений и расчетов первой гармонической частоты собственных колебаний показало в основном их удовлетворительное совпадение, что объясняется, вероятно, тщательным контролем качества работ при изготовлении и установке опор и матов.

Мощность виброизоляции. Мощность изоляции оценивается степенью снижения амплитуды вибраций в системе масса — пружина. Она не может быть измерена непосредственно на практике, и ее определяют, сравнивая измеренные амплитуды вибраций на теле тоннеля в случае применения MFS и безбалластного пути. Такие измерения выполняли при нормальной работе линии в четырех или пяти независимых точках системы MFS различного класса и в двух точках эталонного сечения безбалластного пути. Результаты измерений находились в ожидае-

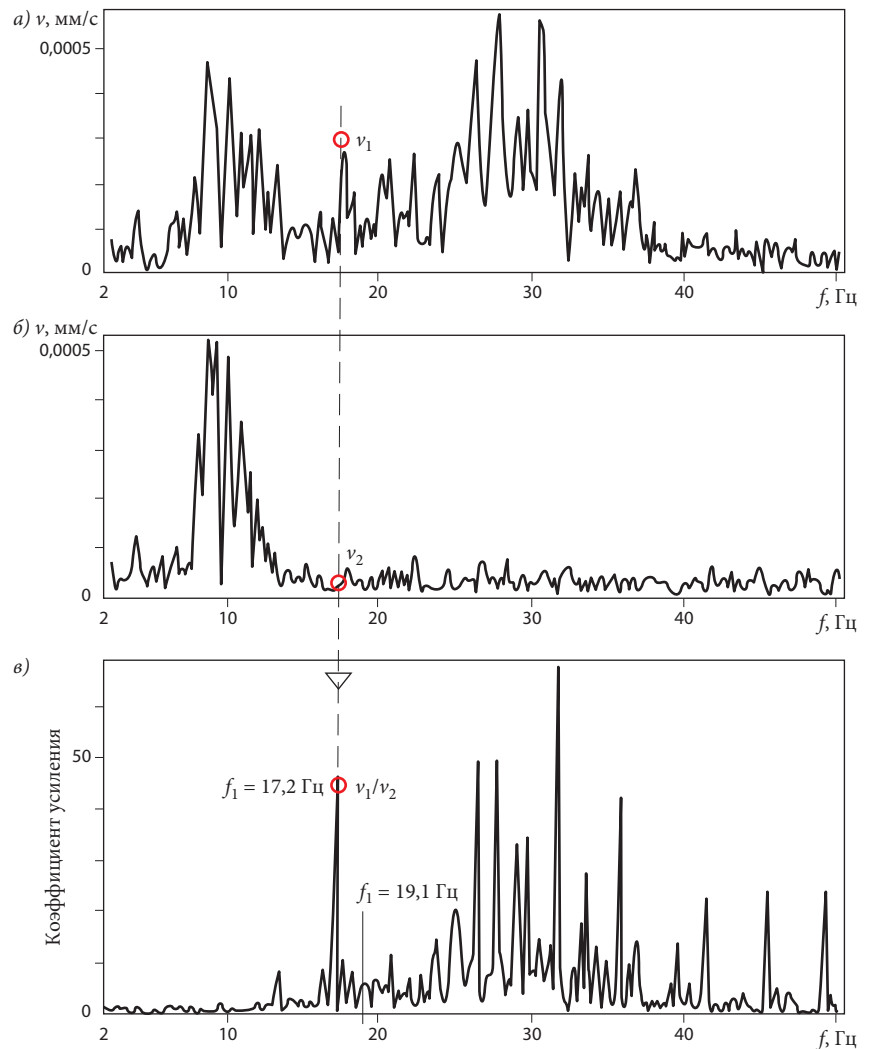


Рис. 10. Результаты измерения собственной частоты системы MFS2 методом возбуждения колебаний грунта:
а — спектр вертикальной опоры; б — спектр боковой опоры; в — относительный спектр; v — амплитуда; f — частота

мом диапазоне, который определили на эталонных объектах (например, на городской железной дороге Цюриха).

Измерения на прилегающих объектах. Одновременно с измерением вибраций в тоннеле инженерное бюро Rutishauser проводило заключительные измерения в соседних зданиях.

Выводы

При разработке и реализации проекта были выполнены строгие требования к защите от вибраций.

Контрольные измерения подтвердили ожидания в отношении эффективности соответствующих мероприятий. На рассматривавшихся критических участках жалоб со стороны населения не поступало. Было установлено, что в прилегающих к тоннелю зонах шум от проходящих поездов был слышен, однако уровень остаточного шумоизлучения значительно ниже допустимого предельного.

По материалам компаний ARGE ZITECH, Heierli-Marchand и инженерного бюро ZIMBA.