

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Х. БРАНДЛЬ — доктор технических наук, профессор, вице-президент Международного общества по механике грунтов и геотехнике ISSMGE (1997–2001), Технический университет, г. Вена, Австрия

А. ПАУЛЬМИЧЛ – Институт механики грунтов и фундаментостроения, Технический университет Вены, Австрия

Лекция, прочитанная на XIII Дунайско-Европейской конференции по геотехнике в г. Любляне, Словения (29–31 мая 2006 г.).

Природный грунт, подбалласт, балласт или основание без балласта, рельсы и шпалы рассматриваются как единая конструктивная система. Предлагается проектная модель, позволяющая определить динамическую реакцию различных систем железнодорожных путей на нагрузку, движущуюся с постоянной скоростью. Основание и рельс моделируются как бесконечная гибкая балка, опирающаяся на непрерывные пружинно-амортизаторные элементы. В предложенную модель между гибкой балкой и пружинно-амортизаторными элементами встроены дополнительные пружины.

Приводятся результаты полевых испытаний, проводимых на высокоскоростных железнодорожных путях; рассмотрено влияние качества путей и деформированности колес на динамические усилия на путь; даются рекомендации по строительству.

ВВЕДЕНИЕ

Для оптимизации проектирования, строительства и эксплуатации, а также модернизации железнодорожных путей для скоростных поездов необходимо тесное сотрудничество строителей и геотехников. Процедура проектирования, основанная на коэффициенте постели Винклера, не отвечает запросам строительства. Сложная усовершенствованная модель объединяет бесконечную гибкую балку и группу пружинно-амортизаторных элементов. Это решение основывается на передаточных функциях, представляющих ряд аппроксимаций. Важную роль играют обратимые и необратимые компоненты деформации, вызванной циклической нагрузкой, различные для железнодорожных путей с балластом и без него.

ДОПУСТИМЫЕ СМЕЩЕНИЯ РЕЛЬСОВ И ОСАДКИ НАСЫПЕЙ

Основной характеристикой обычной конструкции железнодорожных путей является упругая деформация их основания. Она улуч-

шает распределение нагрузки от колес через рельсы на шпалы. Слишком жесткие основания путей (балласт + подбалласт + основание) приводят к большой концентрации нагрузки и, соответственно, большему трению частиц балласта. Это обуславливает местные различия в величинах жесткости и приводит к неравномерным деформациям рельсов при транспортной нагрузке. Неравномерные деформации рельсов ведут к нежелательным перераспределениям динамических усилий от колеса, в результате ухудшается геометрия рельсов, ускоряется износ рельсов, шпал и колес.

При оптимальной конструкции железнодорожных путей (представляющей собой многослойную составную систему, включающую все слои – от природного грунта до рельса) смещения рельсов (суммарная осадка) – находятся в допустимых пределах, зависящих в основном от основания рельса, осевых нагрузок и скорости поезда.

Опыт показывает, что величины упругих деформаций рельсов Δw при пассивной нагрузке от колеса, равной примерно 200 кН, находятся в пределах:

$1,0 \text{ мм} \leq \Delta w \leq 2,2 \text{ мм}$ при $v \leq 160 \text{ км/ч}$;

$1,5 \text{ мм} \leq \Delta w \leq 2,0 \text{ мм}$ для высокоскоростных поездов.

В противном случае возникают проблемы, касающиеся геометрий рельсов и взаимодействия внутри системы «колесо–рельс–шпала (или основание)». Слишком малое смещение негативно влияет на распределение нагрузки, поскольку образуется меньше опорных точек передачи нагрузки. Это увеличивает износ, что приводит к большим смещениям. Напомним, что вследствие коррозии и износа усталостная прочность рельсов при долгосрочной эксплуатации уменьшается примерно на две трети против начальной прочности. Это уменьшает момент инерции профиля рельса и увеличивает перемещения.

Эффективное упругое перемещение рельса зависит в основном от модуля упругости всей конструкции, в которую входит многослойная система, включающая пути и их основание. Поскольку слои взаимодействуют между собой, невозможно вычислить суммарную осадку простым наложением осадок отдельных слоев, рассчитываемых на основе модулей упругости. Эти величины можно определить только в ходе полевых испытаний.

При работе очень жесткого грунта и основания пути (например, вымощенного пути с балластом в скальных породах или на мостах) упругие перемещения рельса зависят только от самого рельса и его крепления. При полевых измерениях было выявлено, что упругие перемещения рельсов уменьшаются с увеличением скорости. Поэтому минимальные допустимые величины Δw для высокоскоростных поездов должны быть выше.

Допустимые пределы суммарных осадок железнодорожных насыпей установлены несколькими государственными документами. Для обычных железнодорожных путей с балластом ограничения менее жесткие, так как данные конструкции достаточно просты в эксплуатации. Остаточные осадки (после строительства) в пределах $s = 10...30 \text{ см}$ считаются допустимыми (они в основном зависят от местных грунтовых условий и неравномерных осадок), хотя при этом на ранней стадии деформации необходимо проводить выравнивание и уплотнение балласта. При больших осадках значительно возрастают затраты на эксплуатацию, а также износ рельсов и колес.

При строительстве вымощенных железнодорожных путей без балласта допустима незначительная разность осадок, поскольку затраты на выравнивание очень велики. Величины остаточных осадок (подъема) составляют:

$s \leq 6 \text{ см}$ при $v \leq 160 \text{ км/ч}$;

$s \leq 3 (1,5) \text{ см}$ при $v \geq 300 \text{ км/ч}$;

$s \leq -0,5 \text{ см}$ (подъем) при $v \geq 300 \text{ км/ч}$.

Эти минимальные величины можно увеличить, если мощеная железнодорожная конструкция допускает корректировки посредством фиксации рельсов. Неравномерные осадки, а следовательно, и градиент мульды осадок должны рассматриваться как важные критерии. Это позволит увеличить суммарные осадки в некоторых местах. С другой стороны, необходимо ограничить и неравномерные осадки между рельсами $\Delta s_{\text{попереч}} \leq 2-3 \text{ мм}$ при $v \leq 160 \text{ км/ч}$.

Горизонтальные смещения железнодорожных путей обычно возникают если:

железнодорожный путь проходит по неустойчивому склону;

наблюдаются неравномерные осадки или расползание насыпи;

действие больших боковых сил по кривому створу сочетается с низкой горизонтальной прочностью подбалласта, основания и/или подстилающих его слоев.

Такие деформации в значительной степени увеличивают износ колес, рельсов и шпал и ограничивают допустимую скорость движения поездов. При этом допустимые горизонтальные смещения обычно ограничиваются следующими величинами:

$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \leq 1...2 \text{ см}$ при $v \leq 160 \text{ км/ч}$;

$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \leq 0,2...0,5 \text{ см}$ при $v \geq 300 \text{ км/ч}$,

несмотря на то, что меньшие величины из уравнения описывают вымощенные пути без балласта, имеющие большую жесткость.

Тем не менее, как и при вертикальных перемещениях, градиент, т. е. радиус кривой следует признать подходящим критерием. В обоих случаях на его величину влияет не только скорость движения поезда, но и общая конструкция, колеса, система вагонов, тип поезда (пассажирский, товарный). Например, система «Пендолино» менее чувствительна к неравномерным деформациям путей, чем обычные поезда.

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ,
ВОЗНИКАЮЩИЕ ВСЛЕДСТВИЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПУТИ ДВИЖУЩЕЙСЯ
НАГРУЗКИ ОТ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ**

В Венском институте механики грунтов и фундаментастроения разработана модель, позволяющая определять динамическую реакцию системы железнодорожных путей на движущуюся с постоянной скоростью нагрузку (Korf & Adam, 2005). Модель устанавливает взаимосвязь между компонентами надземных элементов путей и их основанием и может применяться для описания железнодорожных путей для высокоскоростных поездов, линий метро и товарных поездов.

На первом этапе конструкция (включающая рельс) моделируется как гибкая балка на непрерывных пружинно-амортизаторных элементах, что представляет идеальные пути для высокоскоростных поездов (рис. 1). Движущаяся нагрузка на неподвижной балке рассматривается как неподвижная нагрузка на движущейся балке, что, в принципе, одно и то же, но дает преимущества при математических вычислениях. Для получения статически эквивалентной системы балок в стационарном состоянии необходимо приложить:

линейную нагрузку через основание упругих пружин (коэффициент пружины k)

$$q_k = -wk; \quad (1)$$

линейную нагрузку к основанию демпфера (коэффициент демпфирования c), пропорциональную вертикальной скорости:

$$q_c = -\dot{w}c = +vw'c; \quad (2)$$

линейную нагрузку силы инерции, пропорциональную вертикальному ускорению

$$q_p = -\dot{w}Ap = -v^2w''Ap; \quad (3)$$

и линейную нагрузку, вызванную преломлением и пропорциональную нормальной силе

$$q_N = +w''N. \quad (4)$$

Результирующая линейная нагрузка равна

$$q_{res} = q_k + q_c + q_p + q_N = wk + vw'c - v^2w''Ap + w''N. \quad (5)$$

Помимо q_{res} , в точке $x = 0$ действует сосредоточенная сила F .

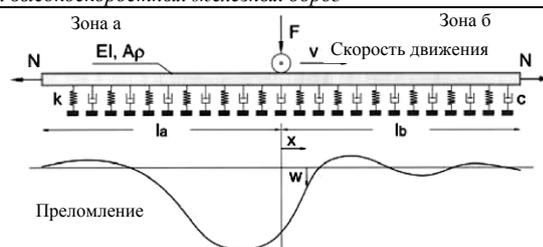


Рис. 1. Эскиз гибкой балки, опирающейся на непрерывные пружинно-амортизаторные элементы, на которые воздействует нагрузка от движущейся сосредоточенной силы. Коэффициент пружины k выводится из коэффициента постели, коэффициент демпфирования можно определить на основе динамических моделей грунта, представляющих слоистое полупространство (Korf & Adam, 2004, 2005)

Решение для этого статического случая получено методом Рабина (Korf & Adam, 2004, 2005) и путем вычисления функции, представленной в виде системы, в которую входит линейное однородное дифференциальное уравнение четвертой степени, описывающее прогиб балки:

$$w'''' - w'''(K_1) - w''(K_2) - w'(K_3) - w(K_4) = 0 \quad (6)$$

при

$$K_1 = 0 [m^{-1}]; \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{N - v^2Ap}{EI} [m^{-2}]; \quad (8)$$

$$K_3 = \frac{vc}{EI} [m^{-3}]; \quad (9)$$

$$K_4 = \frac{k}{EI} [m^{-4}]; \quad (10)$$

Комплексные изучения параметров с использованием рассматриваемой модели подтвердили основополагающие зависимости, где некоторые параметры определяются в безразмерной форме:

длина статической волны

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}; \quad (11)$$

безразмерная координата длины

$$\xi = x\lambda; \quad (12)$$

статический прогиб при $x = 0, N = 0$

$$w_{\text{stat}} = \frac{F \cdot \lambda}{2 \cdot k}; \quad (13)$$

безразмерный прогиб

$$w(\xi) = w(x)/w_{\text{stat}}; \quad (14)$$

критическая скорость (при $N = 0$)

$$v_{\text{cr}} = 2\lambda \sqrt{\frac{EI}{A\rho}}; \quad (15)$$

безразмерная скорость

$$\alpha = \frac{v}{v_{\text{cr}}}; \quad (16)$$

критическое демпфирование

$$c_{\text{cr}} = 2\sqrt{A\rho k}; \quad (17)$$

коэффициент демпфирования

$$\beta = \frac{c}{c_{\text{cr}}}; \quad (18)$$

изгибающая сила (бесконечная балка)

$$N_b = -2\sqrt{EI k}; \quad (19)$$

коэффициент осевой силы (сжатие)

$$\eta = -\frac{N}{N_b}. \quad (20)$$

Прогиб балки выходит за рамки статического решения, зависящего от скорости, жесткости балки и свойств пружин-амортизаторов (рис. 2).

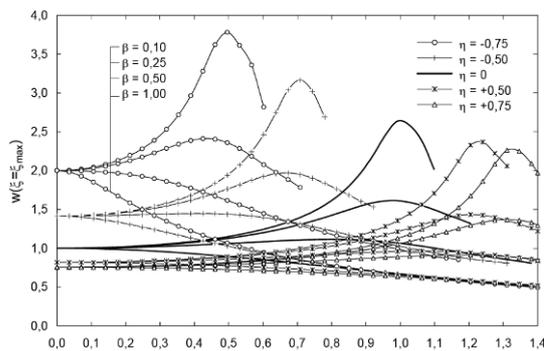


Рис. 2. Безразмерный прогиб $w_{\text{max}}/w_{\text{stat}}$ для выбранных величин безразмерных нормальных сил и коэффициента демпфирования, возникающий вследствие воздействия силы F (Korf & Adam, 2004, 2005)

Максимальный безразмерный прогиб на рис. 2 зависит от безразмерной скорости. Критическая скорость системы уменьшается по мере увеличения отрицательного осевого усилия ($\eta < 0$, давление). Кроме того, очевидно, что в зоне, расположенной ниже критической области ($\alpha < 1$), деформация уменьшается при увеличении коэффициента демпфирования. Однако при низком коэффициенте амортизации величина деформации превышает статическое значение. Отрицательное осевое усилие (давление) на балку приводит к существенному увеличению статической деформации и, следовательно, большей величине максимального прогиба балки. Напротив, положительное осевое усилие на балку (растяжение) в основном вызывает меньшие прогибы.

В случае статической работы линия прогиба симметрична и максимальный прогиб совпадает с точкой приложения силы. При увеличении скорости линия прогиба становится все более асимметричной (рис. 3), вследствие чего максимальный прогиб даже при относительно небольших скоростях увеличивается, однако при очень высоких скоростях он снова уменьшается. По мере возрастания скорости развитие максимального прогиба происходит все с большей задержкой. Длина головной волны перед нагрузкой становится меньше, а волна после нагрузки – длиннее, что соответствует эффекту Доплера в акустике. Следовательно, в случае балки возбуждение колебаний в конструкции появляется при большей частоте до приложения сосредоточенной силы и при меньшей – после ее приложения.

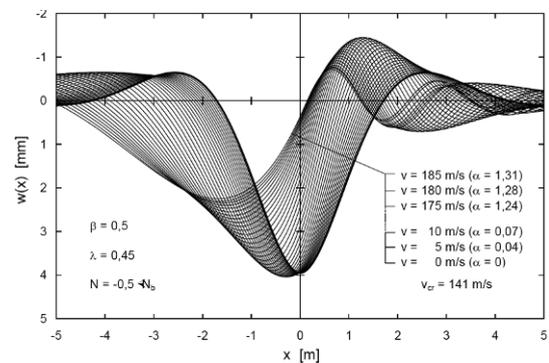


Рис. 3. Линии прогиба для различных скоростей (Korf & Adam, 2004, 2005)

Большеразмерные испытания показали, что результаты, полученные на первом теоретическом этапе (см. рис. 1), оказались недостаточно точными. Поэтому была разработана сложная модель, включающая дополнительные непрерывные пружины между гибкой балкой и пружинно-амортизаторными элементами. Для такой модели требуется решить двойную систему дифференциальных уравнений, поэтому в общем случае лучше создать идеальную балку на двух элементах Кельвина–Войгта, объединенных в группы. Эта общая система легко адаптируется к конкретным случаям (рис. 4). При этом свойства пружинно-амортизаторных элементов, моделирующих многослойную систему, состоящую из балласта, суббалласта и основания, выводятся из динамической конусной модели.

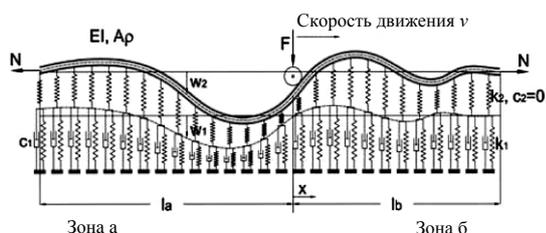


Рис. 4. Моделирование железнодорожного пути в виде балки, поддерживаемой двумя элементами Кельвина–Войгта, объединенными в группы (Korf & Adam, 2004, 2005)

Теоретические выводы можно проверить с помощью полевых измерений и различных испытаний, в ходе которых проводятся многочисленные циклы измерения напряжений и деформаций при повторяющейся процедуре «нагружение–разгрузка–повторное нагружение». Исследования проводились на путях высокоскоростной железной дороги (скорости достигали 230 км/ч), а также вдоль опытных путей венского метро. Приведенные ниже примеры (рис. 5, 6) показывают, насколько велика зависимость динамических модулей реакции основания от скорости движения. В обоих случаях железнодорожные пути располагались на двухкомпонентных шпалах, положенных на мощное основание без балласта, причем величины статического давления и циклы нагружения были одинаковыми. Плиту основания укладывали на гибкую

синтетическую подкладку, помещенную на квазистатическую плиту основания.

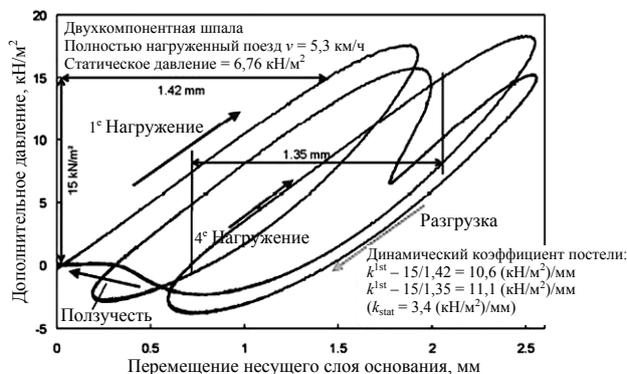


Рис. 5. Зависимость «напряжения–прогиб» для плиты основания железнодорожного пути без балласта при скорости движения $v = 5,3$ км/ч

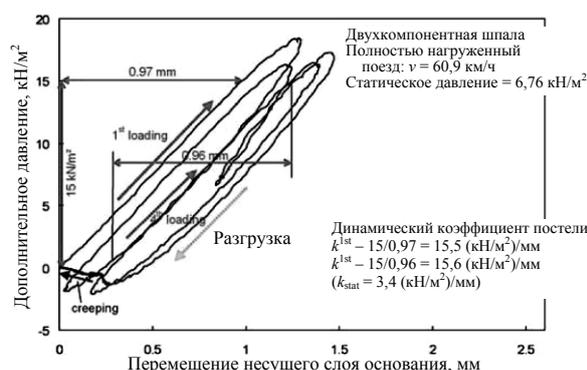


Рис. 6. Зависимость «напряжения–прогиб» для плиты основания железнодорожного пути без балласта при скорости движения $v = 60,9$ км/ч

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПУТЕЙ И ОТКЛОНЕНИЯ КОЛЕС ОТ ФОРМЫ ОКРУЖНОСТИ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА ПУТЬ

Качество путей и скорость движения поездов оказывают значительное влияние на динамические нагрузки (давление) на путь. При плохом качестве путей максимальные динамические усилия могут превысить среднюю квазистатическую осевую нагрузку в два раза при скорости $v = 100$ км/ч и примерно в 2,5 раза при $v = 300$ км/ч (Brandl, 2001). Дефекты рельсов и колес могут привести к нагрузкам, в три раза превышающим нормальную статическую нагрузку на колесо. Такие большие нагрузки всегда связаны с высокочастотной вибрацией.

Другим фактором, который следует учитывать, является нарушение закругленности колес, что в основном случается на высокоскоростных поездах. Это снижает ходовую устойчивость, безопасность и удобство поездки; приводит к увеличению затрат на техническое обслуживание колес и железнодорожных путей. Особо ощутимы для обычных поездов частоты от 50 до 150 Гц, при которых развивается отклонение формы колес от окружности 3...5-й степеней (рис. 7). Это вызывает колебания величин нормальных контактных сил, что способствует местному перенапряжению элементов поезда и рельс и усиливает их износ.

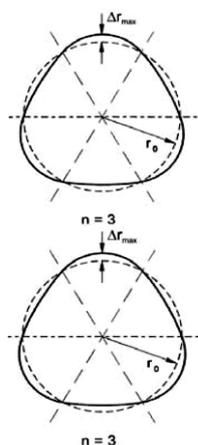


Рис. 7. Отклонение формы колес от окружности 3-й и 4-й степеней

На рис. 8 показана идеализированная модель взаимодействия между поездом, конструкцией железнодорожных путей и их основанием (в которое входят подбалласт, насыпь и природный грунт). Шпала кладется на балласт, при этом центральная зона не имеет опоры (Knothe & Wu, 2000). Эта модель позволяет рассматривать дополнительные упругие компоненты, например, гибкое покрытие основания шпал, гибкий фашинный тюфяк подбалласта. На основе измерений и моделирования результатов определяются коэффициент демпфирования амортизатора c_1 и жесткость пружины k_1 .

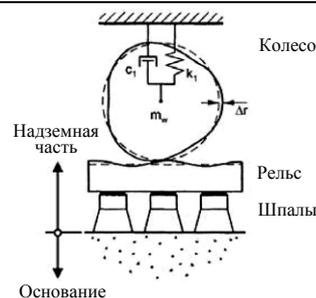


Рис. 8. Идеализированная модель «поезд–рельс–основание» с учетом отклонения формы колес от окружности (Knothe & Wu, 2000)

Кнот и Ву (Knothe & Wu, 2000) выполнили комплексные сравнительные расчеты с учетом разных характеристик балласта и основания. Согласно полученным результатам, очень важную роль играет положение упругих компонентов внутри многослойной конструкции железнодорожных путей. Следовательно, невозможно проводить вычисления, учитывая только один общий параметр упругости (коэффициент постели Винклера).

В рабочем диапазоне частот амплитуда нормальных динамических усилий ΔQ , вызванных отклонением формы колес от окружности, гораздо больше для системы, состоящей из жесткого основания (или подбалласта) и гибкого (адсорбирующего) среднего слоя, чем для системы из основания средней жесткости и жесткого среднего слоя (рис. 9, 10). Различия в работе конструкции являются следствием различных адсорбирующих свойств основания и среднего слоя.

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

На основании теоретических изысканий, параметрических исследований, полевых измерений и наблюдений можно дать следующие рекомендации:

1. Нельзя использовать слишком жесткое основание или подбалласт. Но это не должно достигаться за счет меньшего уплотнения грунта или другого сыпучего материала, как часто рекомендуется. Наилучшим решением является выбор материала, который после оптимального уплотнения достигает средней жесткости (под оптимальным уплотнением подразумевается интенсивное однородное сжатие). В противном случае произойдет

неоднородное сжатие, вызванное движением поездов, что приведет к существенным различиям в локальной жесткости.

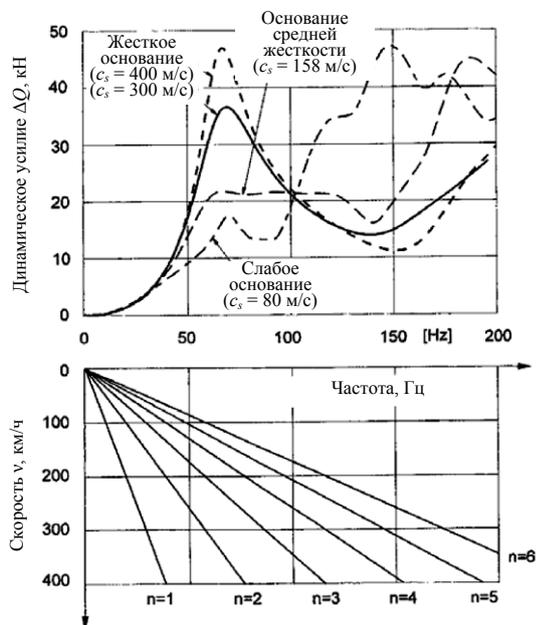


Рис. 9. Нормальная динамическая сила ΔQ , зависящая от частоты, вызванная отклонением формы колес от окружности $\Delta z = 0,1$ мм, для балласта на адсорбирующем промежуточном слое средней жесткости ($k_p = 220$ кН/мм), подстилаемом четырьмя различными подбалластами/основаниями ($c_s = 80, 158, 300$ и 400). Нижний график иллюстрирует зависимости между скоростью поезда, частотой и отклонением колес от формы окружности (порядка $n = 1 \dots 6$) (Knothe & Wu, 2000)

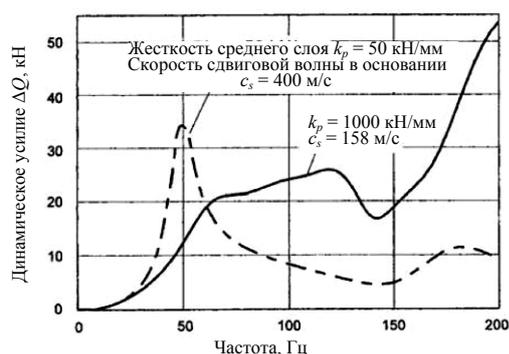


Рис. 10. Нормальная динамическая сила ΔQ , зависящая от частоты, вызванная отклонением формы колес от окружности $\Delta z = 0,1$ мм, для балласта на гибком среднем слое и жестком основании/подбалласте (а) или жестком среднем слое и основании/подбалласте средней жесткости (б)

Оптимальное уплотнение лучше всего осуществлять с помощью встроенной в каток системы оптимизации и контроля сжатия (ССС). Эта технология позволяет избежать локального переуплотнения вследствие разрыхления поверхностной зоны, а также чрезмерного трения и дробления частиц грунта. Метод СССР может применяться для всех слоев: насыпи, подбалласта и основания. Подтвердилась возможность его использования для оптимизации процесса непрерывного уплотнения, контроля оснований, стабилизированных цементом, а также слоев асфальта.

Поведение многослойной железнодорожной системы «нагрузка–деформация» в значительной мере зависит от степени взаимосвязанности слоев. Например, в случае мощных железнодорожных путей без балласта – это связи между бетонной плитой и основанием, стабилизированным цементом основанием, стабилизированным цементом, и нестабилизированным грунтом; нестабилизированным грунтом и основанием. Прочность связи достигается за счет интенсивного уплотнения и придания шероховатости поверхности отдельных слоев перед отсыпкой следующего слоя. Значительную роль должна сыграть разработка новых, например вибрационных, катков с динамическими импульсивными полигональными барабанами. Связь между бетонной плитой покрытия и его основанием способствует уменьшению изгибающих моментов в покрытии.

При наличии очень жесткого основания необходимо устройство упругих промежуточных слоев с высокой адсорбирующей способностью. Конструкционную проблему представляет создание средних слоев с заданной вертикальной деформируемостью без уменьшения боковой жесткости и жесткости на кручение.

Вибрации, возникающие вследствие воздействия динамических нагрузок от поезда, вызывают вертикальное смещение основания путей, которое зависит от осевых нагрузок и скорости поезда; динамических характеристик поездов; взаимодействия между колесом и рельсом и поддержки рельс; характеристик насыпи и надземных конструкций, а также свойств грунта (в том числе, уровня грунтовых вод).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство, техническое обслуживание и модернизация железнодорожных путей для высокоскоростных поездов является сложной междисциплинарной задачей, которая должна решаться в рамках геотехники и строительной механики. Основание (включающее естественный грунт или насыпь) и надземная конструкция должны рассматриваться как единый элемент, состоящий из взаимодействующих компонентов. Теоретические проектные модели так или иначе сводятся к идеализации, поэтому их необходимо выверять в ходе полноразмерных испытаний и полевых измерений. Важную роль играет качество строительства, в особенности качество уплотнения сыпучих слоев основания, а также насыпи. Поэтому рекомендуется применять катки со встроенной системой оптимизации и контроля уплотнения (ССС).

Список литературы

H. Brandl. Geotechnics of rail track structures. Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures (A.G. Correia and H. Brandl, eds.). The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2001.

K. Knothe, Y. Wu. Einfluss der Elastizitätsanordnung im Gleis auf die Beanspruchung durch Radunrundheiten. Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 3, 2000.

F. Kopf, D. Adam. Dynamic effects due to moving loads on tracks for high-speed railways and on tracks for metro lines. Proc. 16th Int. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, 2005.

F. Kopf. Herleitung der Biegelinie für endlich lange Stäbe unter einer gleichförmig bewegten Last in stationärem Zustand mit Hilfe eines Reihenansatzes. Research Report, Institute for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Vienna Technical University, 2004.