

УДК 624.21

Т. В. Жгутова, А. М. Уздин

Петербургский государственный университет путей сообщения

ОЦЕНКА РАБОТЫ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА МОСТАХ С СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЕЙ И ТРЕБОВАНИЯ К СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ РАБОТЫ ПУТИ

Анализируется работа рельсового пути от эксплуатационных нагрузок, вызванных торможением и поперечными ударами подвижного состава. Показано, что традиционная стационарная сейсмоизоляция с парциальным периодом колебаний 2–3 секунды неприемлема для сейсмозащиты железнодорожных мостов. Приводятся приемлемые схемы установки сейсмоизолирующих опорных частей, обеспечивающие эффект сейсмоизоляции. Анализируются нормативное ограничение жесткости опор и возможность его смягчения для сейсмоизолированных мостов.

железнодорожные мосты, сейсмоизоляция, эксплуатационные нагрузки, торможение, поперечные удары, возможность применения сейсмоизоляции.

Введение

Сейсмоизоляция принята в настоящее время в качестве основного средства сейсмозащиты мостов. В мире построены сотни мостов с сейсмоизолирующими опорными частями [4]. Однако для железнодорожных мостов сейсмоизоляция используется пока достаточно редко в связи с опасениями нарушения работы верхнего строения пути (ВСП) при эксплуатационных нагрузках. Отдельные опыты применения сейсмоизоляции для железнодорожных мостов имеются в западных фирмах *Maurer Söhnes*, *ALGA* и *FIP Industriale* [2, 3]. Согласно [2, 3] сейсмоизолирующие элементы блокируются в процессе эксплуатации и включаются в работу при интенсивных сейсмических воздействиях. В бывшем СССР такого рода сейсмоизоляция была использована в Ташкенте при строительстве мостов через каналы Ак-Тепе и Салар на линии Ташкентского метрополитена, а также на подъездных путях промзоны в г. Бекбад [5]. Более сложная система сейсмоизоляции по проекту ОАО «Трансмост» использована при строительстве железнодорожных мостов в г. Сочи. Детальное описание этой системы имеется в статье [1]. Хотя основной проблемой приме-

нения сейсмоизоляции в железнодорожных мостах является работа железнодорожного пути, ни в одном из проектов не приведены оценки напряженно-деформируемого состояния рельсового пути на мостах. Настоящая статья частично компенсирует этот пробел.

1 Ограничения податливости опор и опорных частей в нормах Российской Федерации

В нормах бывшего СССР, а ныне в нормах России безопасность работы ВСП на мостах обеспечивается путем ограничения податливости опор:

$$u_{\max} < a \cdot \sqrt{L}, \quad (1)$$

где $a = 0,005 \text{ м}^{-1/2}$, а u_{\max} и L задаются в метрах.

Если пренебречь жесткостью опор, то смещение пролетного строения относительно опоры:

$$u = \frac{Q}{C} = \frac{q \cdot f \cdot L}{C} = \frac{m(L)}{\frac{C}{m}} = \quad (2)$$

$$= \frac{q \cdot f \cdot L}{m(L) \cdot k^2(L)} = \frac{q \cdot f \cdot L \cdot T^2(L)}{m(L) \cdot 4\pi^2},$$

где Q – сила торможения; C – жесткость сейсмоизолирующей опорной части; q – эквивалентная нагрузка; f – коэффициент для вычисления тормозной силы; m – масса пролетного строения, зависящая от его длины L ; T – парциальный период колебаний сейсмоизолированного пролетного строения вдоль оси моста.

На рис. 1 приведены зависимости $u(T)$ для различных пролетных строений. На этом же рисунке показан диапазон изменения допустимых смещений. Как видно из рисунка, можно допустить лишь ограниченное снижение жесткости опорных частей, лимитируя период продольных колебаний моста величиной порядка 0,6–0,75 секунды. Аналогичный расчет на поперечные удары позволяет использовать сейсмоизоляцию с парциальным периодом колебаний до одной секунды. Смещения пролетного строения относительно опоры при эксплуатационных нагрузках

составляют в этом случае 4–6 см. В рамках указанных ограничений оказывается возможным снизить сейсмическую нагрузку на 25–35 %. Традиционно сейсмоизоляция настраивается на период колебаний 2–3 секунды и позволяет снизить нагрузки более чем в два раза. Для моста это ведет к увеличению смещений пролетных строений относительно опор до неприемлемых размеров 30–40 см.

В связи с этим необходимо решить две принципиальные задачи.

Во-первых, необходим анализ и конкретизация ограничения (1), которое было принято более 40 лет тому назад без какого-либо расчетного обоснования. Увеличение допустимого смещения от эксплуатационных нагрузок до 8–12 см в уровне сейсмоизоляции существенно повышает эффективность сейсмоизоляции.

Во-вторых, необходима разработка эффективных технических сейсмоизоляционных решений, обеспечивающих как безопасную эксплуатацию моста, так и существенное снижение расчетных сейсмических нагрузок.

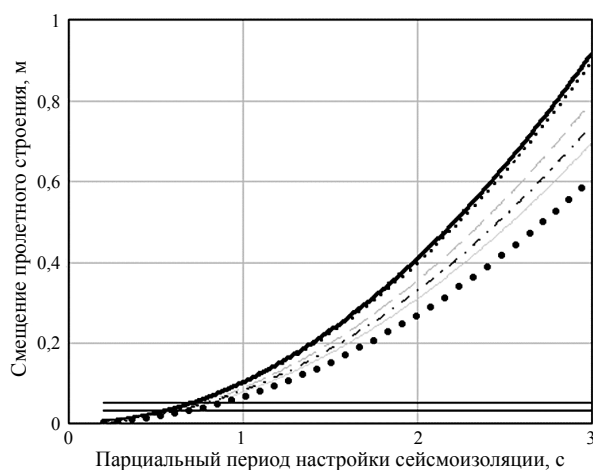


Рис. 1. Зависимость смещения пролетного строения относительно опоры от парциального периода сейсмоизоляции при торможении поезда (сплошная линия – $L = 44$ м; точечная – $L = 55$ м; пунктир – $L = 55$ м; штрих-пунктир – $L = 66$ м; жирная точечная – $L = 110$ м; прямыми линиями обозначен диапазон изменения допустимых смещений)

2 Оценка влияния податливости сейсмоизоляции на напряженно-деформируемое состояние рельсового пути при поперечных нагрузках

Роль эксплуатационной поперечной нагрузки на мост играют поперечные удары подвижного состава, обусловленные волнообразным движением поезда с периодическим накатыванием вагонов на одну из рельсовых нитей. Ниже анализируется напряженно-деформируемое состояние рельсового пути на двух пролетах длиной $L = 33$ м. Предполагается, что накатывание вагонов происходит на пролетных строениях на разные рельсовые нити, т. е. нагрузка на пролетных строениях имеет противоположное направление. При расчетном анализе рассмотрено шесть вариантов моста. Первые два варианта – базовые. Они предусматривают обычные опорные части с жестким в поперечном направлении соединением с опорами. Один

из вариантов предусматривает путь на балласте, другой – безбалластное мостовое полотно (БМП). Две другие пары вариантов предусматривают мост с податливыми опорными частями при аналогичном устройстве ВСП. При этом рассматривается простая и объединяющая сейсмоизоляция [5]. В первых двух вариантах всесторонне изолирующие опорные части устанавливаются вместо неподвижных, а продольно-подвижные опорные части сохраняются. Во втором случае все опорные части всесторонне сейсмоизолирующие, что объединяет пролетные строения в цепочку [5]. Расчетная схема рассматриваемых систем приведена на рис. 2, а результаты расчетов – на рис. 3, 4 и в табл. 1.

Из рисунков ясно видно, что всесторонняя сейсмоизоляция приводит к заметным взаимным смещениям пролетных строений и, в свою очередь, к росту усилий в рельсе.

Результаты расчета позволяют сделать следующие выводы:

1. При отсутствии сейсмоизоляции напряжения в рельсах от ударов подвижного состава пренебрежимо малы. При езде на балласте они составляют 6,7 МПа, а для БМП – 2,7 МПа. На балласте имеют место взаимные смещения рельсов над опорой, но они незначительны.

2. Традиционно применяемая за рубежом конструкция распределяющей сейсмоизоляции с устройством всесторонне податливых опорных частей на всех опорах нецелесообразна для железнодорожных мостов. Для БМП напряжения в рельсовых плетях только от поперечных ударов достигают 240 МПа. При том, что температурные напряжения в рельсах доходят до 60–80 МПа, а напряжения от вертикальной нагрузки могут добавить еще до 10 МПа, суммарные напряжения в рельсах достигнут 330 МПа. Это означает, что в рассматриваемом случае (пролетные строения $L = 33$ м) по условию прочности при эксплуатационных нагрузках могут быть применены только термоупрочненные рельсы, а увеличение пролета вообще недопустимо.

3. Приемлемым можно считать сейсмоизоляцию с использованием одной податливой и одной продольно неподвижной группы опорных частей под пролетное строение. При использовании езды на балласте в рассматриваемом случае расчетные напряжения в рельсах составляют 180 МПа. Этот результат позволяет прогнозировать возможность применения рассматриваемой сейсмоизоляции на мостах с пролетами до 66 м при использовании термоупрочненных рельсов с допустимыми напряжениями 580 МПа.

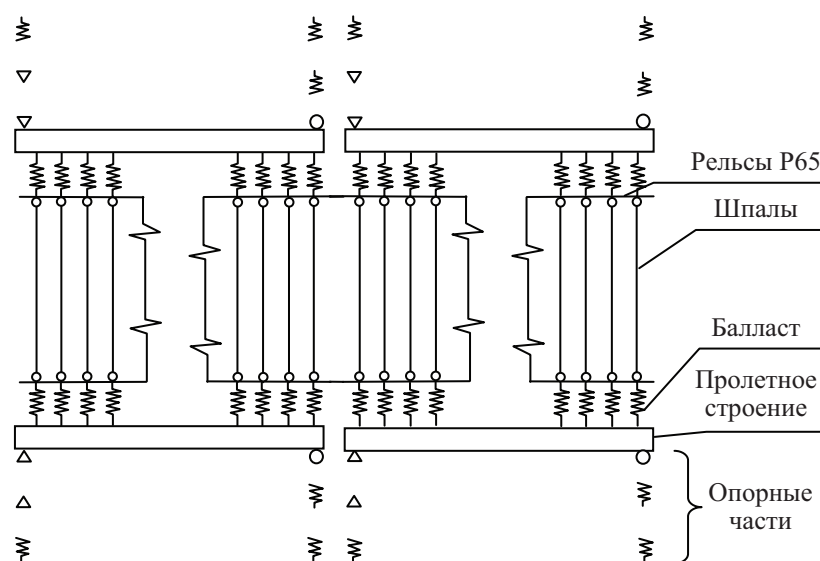


Рис. 2. Схема расчета усилий в рельсах от поперечных ударов

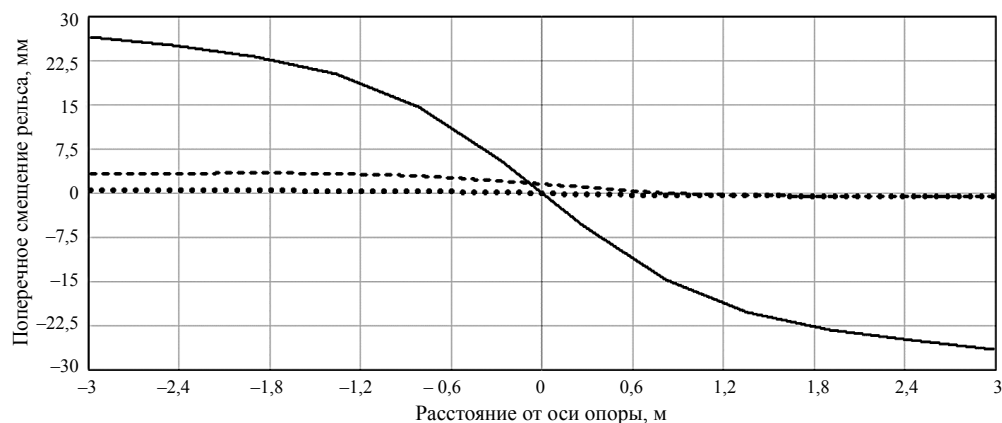


Рис. 3. Эпюры поперечных перемещений рельсового пути с ездой на балласте (точечная линия – традиционная; пунктир – с простой сейсмоизоляцией; сплошная линия – объединяющая сейсмоизоляция)

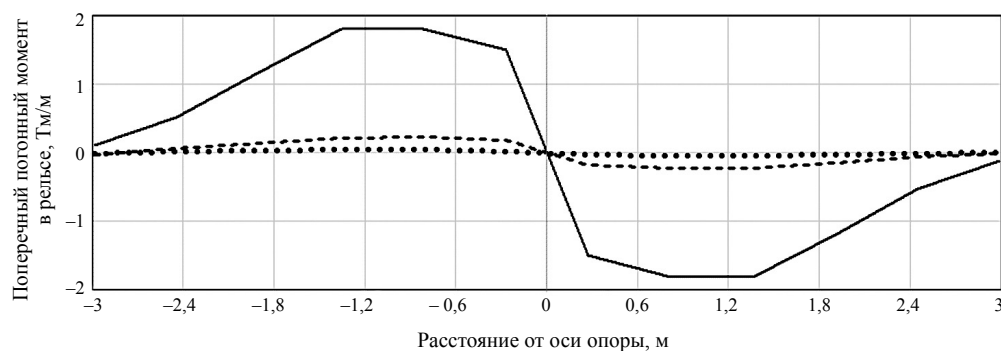


Рис. 4. Эпюра поперечных моментов в рельсовом пути с ездой на на балласте (точечная линия – традиционная; пунктир – с простой сейсмоизоляцией; сплошная линия – объединяющая сейсмоизоляция)

ТАБЛИЦА 1. Максимальные напряжения в рельсе Р65

Схема, жесткость балласта	Макс. смещения, мм	Макс. момент в рельсе, кНм	Макс. перерезывающая сила в рельсе, кН	Напряжения в рельсе, МПа
№ 1, 75 МН/м	0,15	0,2	2,3	2,7
№ 1, 10 МН/м	0,52	0,5	2,4	6,7
№ 2, 75 МН/м	3,5	4,6	17,8	61,3
№ 2, 10 МН/м	3,8	2,3	6,8	30,7
№ 3, 75 МН/м	137	16,4	70	218,6
№ 3, 10 МН/м	137	18,2	60	242,7

4. Для мостов пролетами более 33 м, при использовании сейсмоизоляции с парциальным периодом более 1,5 с и при использовании БМП, необходим расчет напряжений в рельсовом пути.

5. Во всех случаях при использовании сейсмоизоляции мостов предпочтительнее мост с ездой на балласте. При пролетах моста более 33 м сочетание БМП и обычной сейсмоизоляции в виде гибких опорных частей и демпферов неприемлемо.

6. В рассмотренном исследовании требования норм к ограничению гибкости опор не соблюдались. Смещения пролетного строения относительно опоры примерно в два раза превосходили допустимые нормы. Тем не менее усилия в рельсах оказались допустимыми. При этом смещения пролетных строений относительно опор достигали 7 см против 2,7 см по СНИП.

7. Основной вывод из проведенного исследования состоит в том, что для железнодорожных мостов с пролетами более 66 м необходимы более сложные системы сейсмоизоляции, включающиеся в работу при нагрузках, превосходящих эксплуатационные.

3 Оценка влияния податливости сейсмоизоляции на напряженно-деформированное состояние рельсового пути при продольных нагрузках

Для анализа напряженно-деформированного состояния рельсовых плетей при

торможении рассмотрим трехпролетный мост, показанный схематично на рис. 5.

Жесткости опор обозначены через C_{pi} . Массы пролетных строений и приведенные массы опор – через M_i . С пролета на пролет передается усилие F_{rail} обусловленное наличием рельсовых плетей. Это усилие принято равным произведению жесткости ВСП на смещение рельсов, но не более 200 кН. Жесткость пути принята равной 2 (кН/м)/м для езды на балласте.

Опорные части показаны на рисунке условно. Их жесткости обозначены через Cb_i . Рассматриваются три варианта размещения шести опорных частей.

Первый вариант – базовый. Согласно ему, предусматриваются следующие опорные части: неподвижная, подвижная, неподвижная, подвижная, неподвижная, подвижная. Во втором варианте все неподвижные части заменены податливыми. В третьем варианте все опорные части податливые. Иными словами, во втором варианте реализуется принцип простой сейсмоизоляции, а в третьем – принцип объединяющей сейсмоизоляции [4].

Расчет рассматриваемой системы выполнен в динамической постановке. При этом считалось, что сила торможения линейно возрастает от нуля до расчетного значения в течение 20 секунд и далее остается постоянной в течение 15 секунд.

Расчеты показали, что во всех случаях опирания нагружение может рассматриваться как статическое. В начале торможения имеют место вибрации системы, показанные на рис. 6, где приведены зависимости

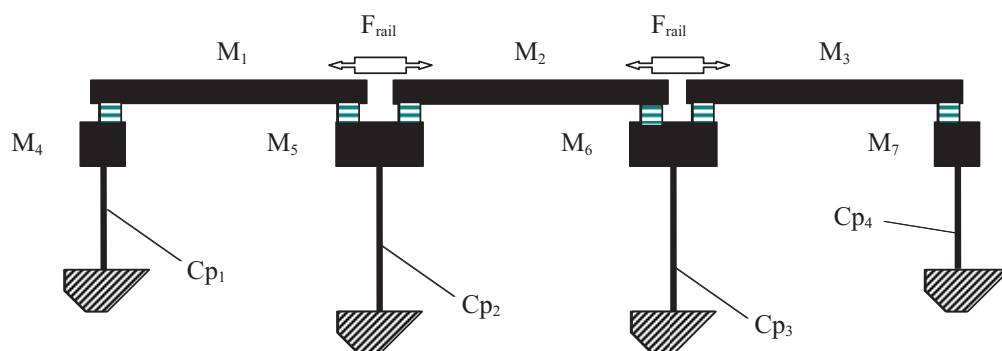


Рис. 5. Схема трехпролетного моста

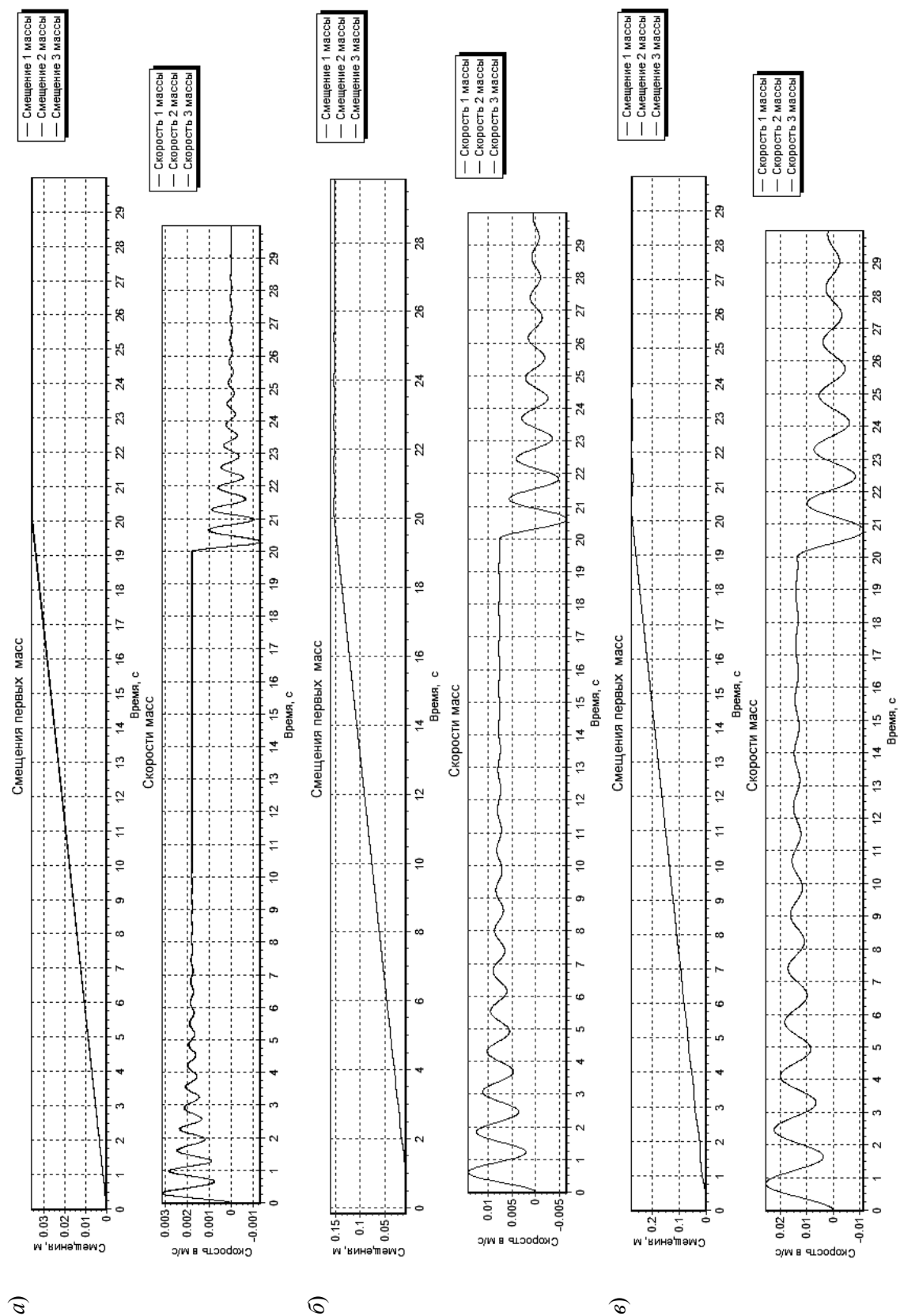


Рис. 6. Зависимость смещений и скоростей пролетного строения от времени при торможении поезда на мосту:
а – для обычных опорных частей; *б* – для простой сейсмоизоляции; *в* – для объединяющей сейсмоизоляции

скоростей пролетного строения от времени. Вибрации возникают в момент возникновения торможения и в момент, когда прекращается рост тормозной силы.

В табл. 2 и 3 приведены максимальные при торможении смещения для случая, когда поезд занимает всю длину моста (табл. 2) и первые два пролета (табл. 3).

Из полученных результатов можно сделать три вывода.

1. Традиционные сейсмоизолирующие опорные части при настройке сейсмоизоляции с периодом колебаний $T = 2\text{--}3$ секунды

затруднительно использовать для сейсмоизоляции железнодорожных мостов, поскольку при этом возникают смещения пролетных строений, равное 15–25 см. Это требует установки одного, а при большой длине моста – двух-трех уравнивающих приборов, воспринимающих эти смещения.

2. Для мостов с регулярной схемой взаимные смещения пролетных строений оказываются незначительными и воспринимаются балластом. Разница смещений и, как следствие, проскальзывание рельсовых плетей отмечены на подходах к мосту.

ТАБЛИЦА 2. Смещения пролетных строений по всей длине моста при торможении поезда

Тип опорных частей	Характеристика смещений	Смещения пролетных строений, см			
		№ 1		№ 2	
Обычные опорные части	Смещения	3,52		3,55	
	Взаимные смещения	0,029		0,013	
Простая сейсмоизоляция	Смещения	27,316		27,320	
	Взаимные смещения	0,039		0,0123	
Объединяющая сейсмоизоляция	Смещения	15,250		15,254	
	Взаимные смещения	0,033		0,033	

ТАБЛИЦА 3. Смещения пролетных строений на первых двух пролетах моста при торможении поезда

Тип опорных частей	Характеристика смещений	Смещения пролетных строений, см			
Обычные опорные части	Смещения	2,561		2,423	
	Взаимные смещения	0,138		0,336	
Простая сейсмоизоляция	Смещения	18,465		18,277	
	Взаимные смещения	0,188		0,384	
Объединяющая сейсмоизоляция	Смещения	10,418		10,234	
	Взаимные смещения	0,183		0,382	

3. Распределяющая сейсмоизоляция вызывает меньшие продольные смещения пролетных строений, чем простая.

Заключение

Исследование позволяет дать следующие рекомендации по устройству сейсмоизоляции на железнодорожных мостах.

1. При использовании для сейсмозащиты железнодорожных мостов сейсмоизолирующих опорных частей наиболее рациональный способ – устройство в продольном направлении объединяющей сейсмоизоляции с установкой на всех опорах продольно-податливых опорных частей и закрепление каждой второй опорной части против поперечных смещений.

2. Рельсы на сейсмоизолированных мостах следует делать термоупрочненными.

3. Представляется возможным снизить требования СНиП к податливости верха опор, увеличив допустимые продольные перемещения пролетных строений до 10 см. Однако при этом необходимо учитывать усилия в рельсовых плетях и их смещения от поперечных ударов и торможения подвижного состава.

4. При соблюдении указанных требований возможно довести парциальную частоту колебаний сейсмоизолированного пролетного строения до 0,9–1,2 секунд. При этом

можно снизить нагрузки на 50–70 %. Для увеличения эффективности сейсмоизоляции необходимо использовать двойную систему опирания, с исключением жестких элементов при землетрясениях расчетной силы.

Библиографический список

1. **Seismic** protection of railway bridges in Sochi / I. O. Kuznetsova, A. M. Uzdin, T. V. Zhgutova, S. A. Shulman. «Bridges seismic isolation and large-scale modeling», Proceedings of workshop, ASSISi, Saint-Petersburg, 2011. – PP. 28–37.

2. **Base** isolated system for railway bridges: beneficial or detrimental? / Luigi Di Sarno. «Bridges seismic isolation and large-scale modeling», Proceedings of workshop, ASSISi, Saint-Petersburg, 2011. – PP. 16–28.

3. **Realized** projects of Isolation Systems for Railway Bridges in Spain, Hungary and Greece / Peter Huber (Maurer Söhnes). «Bridges seismic isolation and large-scale modeling», Proceedings of workshop, ASSISi, Saint-Petersburg, 2011. – PP. 37–51.

4. **An introduction** to seismic isolation / R. I. Skinner, W. H. Robinson, G. H. McVerry. New Zealand. John Wiley & Sons, 1993. – 353 p.

5. **Seismic** isolation. Present condition / T. A. Belash, V. S. Belyaev, A. M. Uzdin, A. A. Ermoshyn, I. O. Kuznetsova. Article collection «Professor Savinovs' selected articles and key reports made at the 4th Savinovs' readings», St. Petersburg, JSC «Leningradsky Promstroyproject», 2004. – PP. 95–128.

УДК 001.894

А. В. Колтаков

Петербургский государственный университет путей сообщения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФОРМЫ ВОЗВЫШЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КРЕСТОВИНЫ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

С 1980-х гг. на кафедре «Промышленный и городской транспорт» ведется работа над увеличением срока службы крестовины стрелочного перевода. Для ведомственных железных дорог наиболее перспективным является направление по разработке и внедрению крестовины с запасом