

СЕЙСМОСТОЙКИЙ УСПОКОИТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Т.Б.ИМАНАЛИЕВ, Р.Э.КАРАТАЕВ
E.mail. ksucta@elcat.kg

Бул макалада темир жолдогу сейсмикалык күчтөрдү төмөндөтүү чечимдери сунуш кылынат.

В работе предлагается решение по снижению сейсмической и подвижной нагрузки на железнодорожный путь.

In this paper, we propose a solution to reduce the seismic and live loads on the railway track.

Актуальность темы исследования. Железнодорожный путь представляет собой сложную систему из грунтовых сооружений, железобетонного основания пути, стальных балок сложного сечения рельсов и различных искусственных сооружений, предназначенных для защиты пути от условий геологии, гидродинамики, аэродинамики, гляциологии и других опасных экзогенных, эндогенных процессов. В процессе эксплуатации железнодорожный путь воспринимает наравне со статическими воздействиями сильные динамические нагрузки. В условиях Кыргызстана наиболее актуальной из них является сейсмическая нагрузка. Сейсмические колебания с магнитудой более 6 происходят в Кыргызстане очень часто, и, согласно отчету Института сейсмологии НАН КР, стоит ожидать землетрясения с магнитудой 7-8 в ближайшей перспективе. Деформации железнодорожного пути от действия сейсмических сил довольно хорошо изучены и представляют собой нарушение геометрии пути как по вертикали, так и в горизонтальной плоскости. Пластические деформации грунтового сооружения сопряжены с физико-механическими характеристиками осадочных горных пород, из которых, как правило, сооружают земляное полотно железных дорог. Значительное линейное развитие грунтовых сооружений также является фактором повышенного риска развития пластических деформаций, так как разные участки железных дорог при действии сейсмических сил воспринимают отличные от соседних участков нагрузки по частотным и силовым параметрам. Когда происходят пластические деформации грунтового основания пути, железобетонные и металлические конструкции, известные как верхнее строение пути или рельсо-шпальная решетка, лишаются основания, следствием чего становится неизбежное нарушение целостности конструкций, что можно охарактеризовать как деформацию пути или нарушение его геометрии. В случаях, когда это происходит при движении по железнодорожному пути подвижных составов, сход с рельсов поездов – вполне ожидаемый процесс, результатом чего могут стать значительные человеческие жертвы.

Другой актуальной проблемой в обеспечении устойчивости железнодорожного пути является подвижная динамическая нагрузка. Железная дорога и все сопутствующие искусственные сооружения подвергаются постоянной подвижной нагрузке. Степень интенсивности подвижной нагрузки напрямую зависит от транспортно-логистической нагрузки всей сети железных дорог, что является следствием роста экономики и развития торговли. В этих условиях в целях обеспечения все более растущих потребностей рынка в транспортных услугах необходима глубокая модернизация существующей транспортной инфраструктуры, состояние которой, по самым благоприятным оценкам, далеко от требуемых параметров. Действие подвижной нагрузки на железнодорожный путь в первом приближении можно сравнить с действием сейсмических сил. Подобие двух динамических

составляющих этих нагрузок можно характеризовать в резонансных колебаниях конструкций сооружений: чем больше вес подвижного состава и его скорость, тем выше значения по критериям подобия к сейсмическим силам.

В этой связи существует необходимость защиты железнодорожного пути от опасных динамических нагрузок. В этой работе предлагается использовать наиболее перспективное направление по пассивному противодействию сейсмическим и иным динамическим силам. Инерционные гасители показали высокую эффективность в сейсмостойком строительстве и проэкзаменованы сильнейшими землетрясениями. Наиболее яркая практика применения инерционных гасителей известна в высотном сооружении Тайбэй 101, где использован груз весом 660 т на верхних уровнях здания (рис. 1).

Тайбэй 101 сконструирован для эксплуатации в природных условиях, типичных для Юго-Восточной Азии, где нередки тайфуны и землетрясения. Инженеры, работавшие над зданием, заявляют, что оно может выдержать порывы ветра до 60 м/с (216 км/ч) и сильнейшие землетрясения. Задачей инженеров было спроектировать небоскреб, одновременно не очень жесткий для того, чтобы противостоять сильным ветрам, и, в то же время, прочный, чтобы предотвратить поперечные смещения (боковой сдвиг). Низкая жесткость предотвращает повреждения конструкции при сильных изгибающих моментах, при этом должен сохраняться высокий уровень комфорта сотрудников и посетителей башни, кроме того, недопустимы деформации, приводящие к дополнительной избыточной нагрузке на панели остекления и несущих перегородках. Обычно для увеличения прочности применяют усиления конструкции, например, раскосами. Также высота Тайбэй 101 предъявляла инженерам дополнительные требования по устойчивости и прочности, что требовало внедрения инновационных методов строительства. Прочность и, одновременно, гибкость башни достигается, в том числе, применением в строительстве высококачественной стали. Здание поддерживают 36 колонн, включая восемь главных колонн из бетона с прочностью в 70 МПа. Каждые восемь этажей аутриггерные фермы соединяют колонны в ядре здания с внешней нагрузкой. Перечисленные выше особенности конструкции, а также прочность фундамента делают Тайбэй 101 одним из самых устойчивых зданий, когда-либо возведенных человеком. Фундамент состоит из 380 свай, забитых на 80 метров в породу, из них около 30 метров – в скальном основании. Каждая свая имеет диаметр 1,5 метра и может нести нагрузку в 1000-1300 тонн. Устойчивость конструкции прошла испытания в 2002 году, когда 31 марта в Тайбэе произошло землетрясение магнитудой 6,8(!). Из-за землетрясения было разрушено два крана, установленных на строящемся здании, погибло 5 человек. Обследование показало, что никакого вреда землетрясением башне причинено не было, и строительство возобновилось /1/.

Thornton-Tomasetti Engineers вместе с Evergreen Consulting Engineering был спроектирован 660-тонный стальной маятник, являющийся инерционным демпфером колебаний. Его цена составляла 4 миллиона долларов. Подвешенный на 88-92 этажах, маятник колеблется, компенсируя движения здания, вызванные сильными порывами ветра. Его сфера, крупнейшая в мире, состоит из 41 стальной пластины, каждая толщиной 125 мм, что вместе составляет 5,4 м в диаметре. Два других гасителя колебаний, каждый весом 6 тонн, находятся на вершине шпиля. Они смягчают удары ветра, действующие на верхнюю часть здания. Энергия колебаний, накопленная демпферами, гасится системой пружин, расположенных под демпферами.



Рис. 1. Инерционный гаситель в Тайбей 101

Предлагаемое техническое решение «Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути» предназначен для практической реализации принципов пассивного противодействия сейсмическим силам. Реализация этого проекта возможна на электрифицированных железных дорогах, так как по условиям конструкции инерционный гаситель локализуется внутри опоры линии контактной сети железных дорог, потому что строительство дополнительных опор для инерционного гашения колебаний представляется необоснованным с экономической точки зрения. В целях повышения сейсмостойкости существующих железных дорог с существующими опорами контактной сети возможен вариант локализации инерционного гасителя в теле опоры. В условиях Кыргызстана, где железные дороги не электрифицированы, рекомендуется сооружение отдельной инфраструктуры инерционного гашения, т.е. опорной части, в районах, наиболее подверженных сильным землетрясениям или на наиболее ответственных участках железных дорог, таких как места сопряжения с мостовыми сооружениями, водопропускными трубами, противолавинными галереями.

Очевидность необходимости электрификации железных дорог Кыргызстана не вызывает сомнений. Сжигание углеводородов в тепловых локомотивах, использование морально и технически устаревших советских и российских подвижных составов очень неблагоприятно сказываются на экологии. Тяговые и скоростные характеристики подвижного состава на тепловой тяге намного хуже в сравнении с электрической тягой. В этой связи, а также в случае реального реформирования железнодорожной отрасли и обновления железнодорожной инфраструктуры стоит ожидать электрификацию железнодорожных магистралей Кыргызстана. И при реализации проекта международной магистрали из Китая в Узбекистан можно рекомендовать использование инерционного гасителя.

Конструктивно инерционный успокоитель колебаний представляет собой цилиндр весом 200 кг, подвешенный на тросы и опертый на пружинное основание. Конструкция размещается внутри опоры линии контактной сети железных дорог. Передача колебаний от железнодорожного пути к инерционному гасителю осуществляется посредством поперечной балки, которая жестко закреплена в опорной части. Сама поперечная балка с одной стороны закреплена к опоре, с другой стороны замещает собой железнодорожную шпалу, оперта на земляное полотно и является основанием для рельсов. При прохождении подвижных составов возбуждаемые ими продольные и поперечные нагрузки передаются по балкам-шпалам к опорной части, где размещен инерционный гаситель. Эти нагрузки воспринимаются опорами и передаются через пружинное основание и тросы на груз, который колеблется с периодом, формой и частотой колебаний, отличными от периодов, форм и частоты колебаний железнодорожного пути, что предотвращает развитие резонансных явлений на теле самого железнодорожного пути. По своей сути инерционный

гаситель воспринимает колебания пути на себя, колеблется сам и затухает, при этом происходит, во-первых, гашение опасных колебаний, во-вторых, не возникают опасные резонансные колебания пути. Амплитудно-частотные характеристики напрямую зависят от веса гасителя, величины передаваемой кинетической энергии и физических пределов амплитуды колебаний гасителя, что можно регулировать ограничителями. Теоретические исследования и их проверка в численных симуляционных средах показали оптимальный вес груза в 200 кг для железных дорог, где вес брутто подвижных составов не превышает 5000 т. При этом размещение инерционных гасителей на каждой опоре линии контактной сети обязательно с шагом, соответствующим шагу опорных частей.

Пассивное противодействие сейсмическим силам происходит по аналогичной схеме, лишь с поправкой, что возбуждаемые колебания передаются от грунтов основания к земляному полотну, далее на поперечные балки-шпалы. Тут, очевидно, происходит вертикальная передача кинетической энергии, что обуславливается механизмами передачи сейсмических сил на вертикальные сооружения. Техническое решение поясняется рис. 2, 3. Результаты расчетов и численных экспериментов в среде Selena приведены в сравнительных графиках.

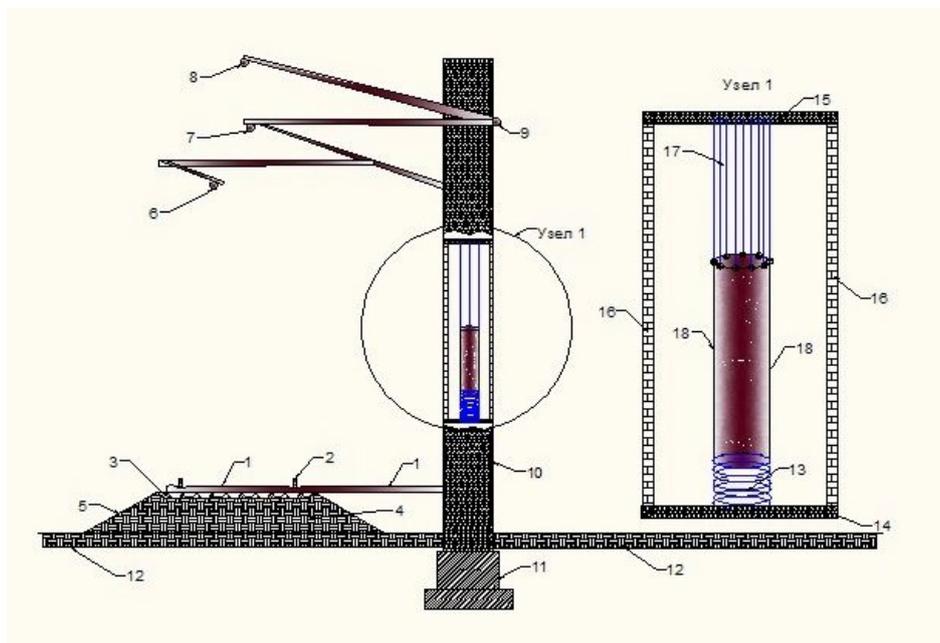


Рис. 2. Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути:

- 1 – поперечная балка-шпала; 2 – рельс; 3 – балластная призма; 4 – земляное полотно; 5 – откос земляного полотна; 6 – контактный провод; 7 – несущий трос; 8 – отсасывающий провод; 9 – обратный провод; 10 – несущая опора; 11 – фундамент опоры; 12 – грунты основания; 13 – пружинный демпфер; 14 – основание пружинного демпфера; 15 – основание подвесных тросов; 16 – обшивка из демпфирующего материала; 17 – подвесные тросы; 18 – инерционный успокоитель колебаний $m=200$ кг

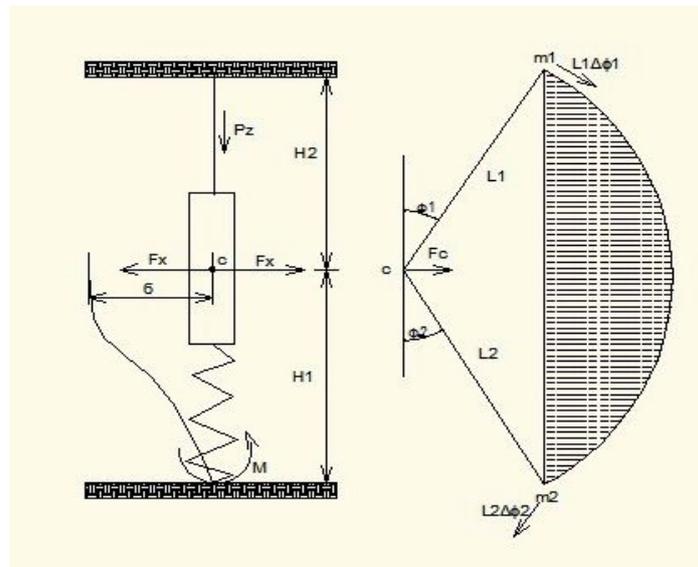


Рис. 3. Расчетная схема предложенного технического решения

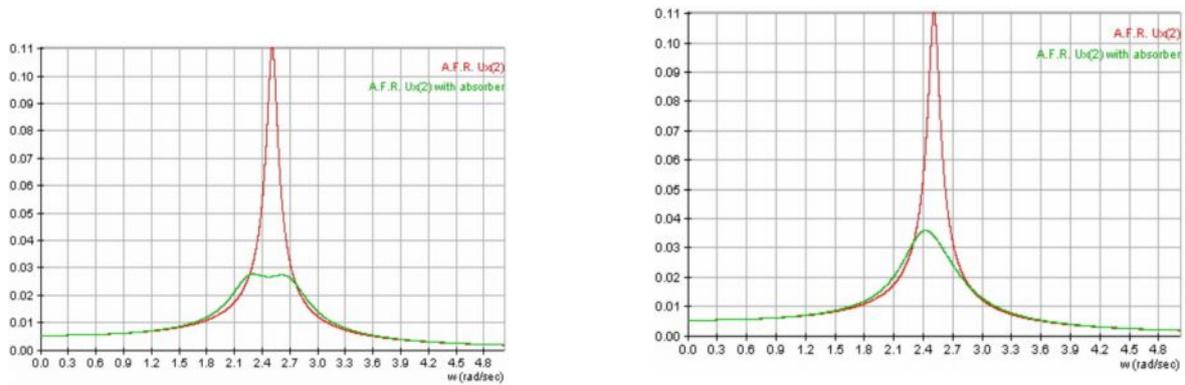


Рис. 4. Колебания ж.-д. пути при действии продольной поперечной сейсмической нагрузки

$M=7,0$

Красная линия – ж.-д. путь без инерционного гасителя;
 зеленая линия – ж.-д. путь с инерционным гасителем

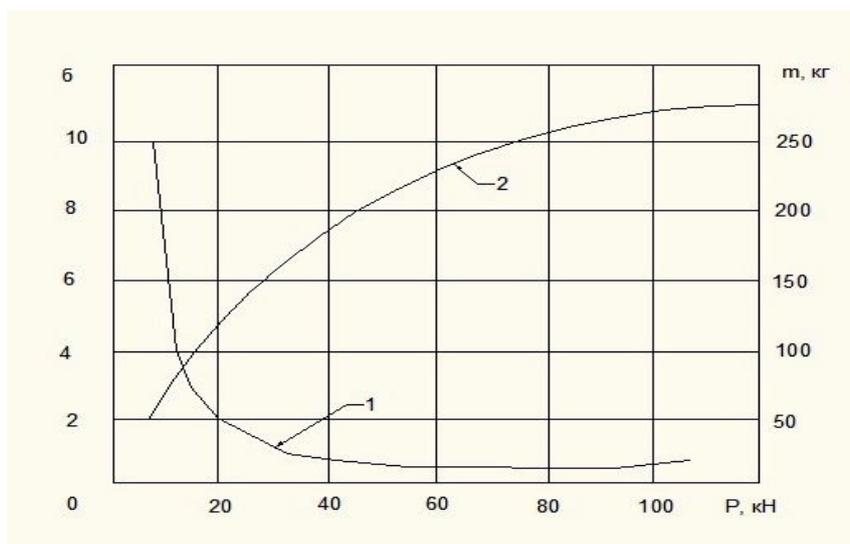


Рис. 5. График зависимости декремента инерционного гасителя от его веса:

1 – декремент гасителя; 2 – вес гасителя

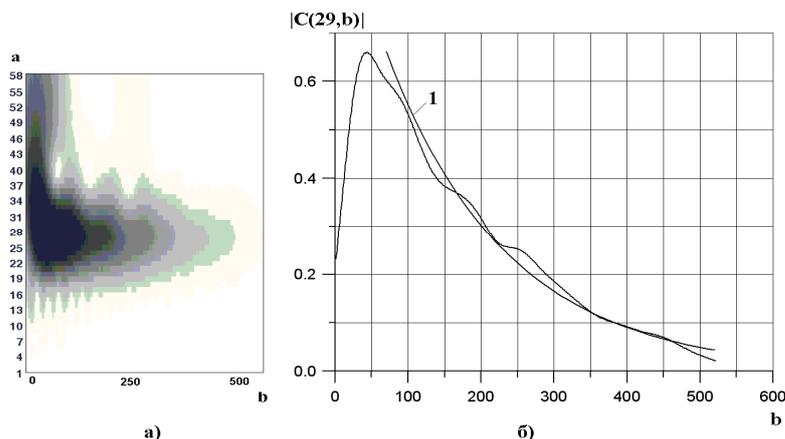


Рис. 6. График собственного затухания колебаний инерционного успокоителя:
 а – проекция поверхности амплитуды собственного затухания;
 б – сечение поверхности амплитуды затухания плоскостью $a=a_0=29$;
 1 – аппроксимация сечения при $b \geq b_0$

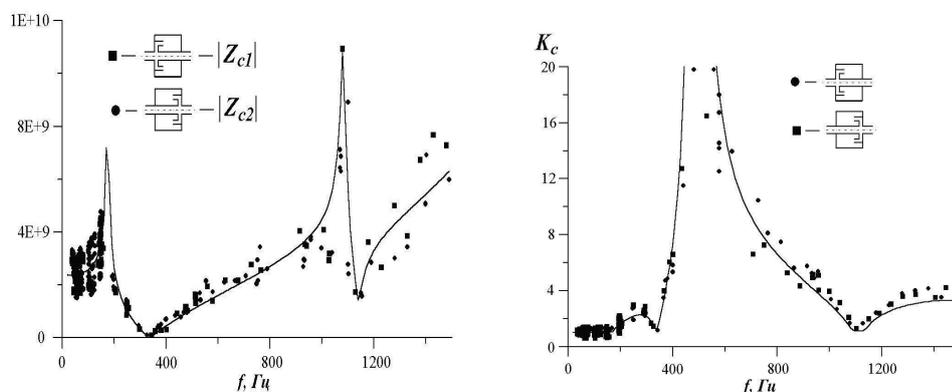


Рис. 7. Частотные параметры собственных колебаний инерционного гасителя
 Теоретические и экспериментальные данные

Расчетное обоснование предложенного технического решения

Наиболее перспективным для гашения колебаний сооружений с собственными периодами $T_0 \geq 2$ с или частотами собственных колебаний $f \leq 0,5$ Гц используют динамические гасители в виде маятника с демпфированием. Уравнение колебаний такого гасителя имеет вид [2/

$$\varphi + 2n\dot{\varphi} + \frac{g}{m_1 + m_2} \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2} \right) \varphi = 0, \quad (1)$$

где φ – угловое отклонение гасителя от положения равновесия; m_1 – верхняя (наружная) масса гасителя колебаний; m_2 – нижняя (внутренняя) масса гасителя колебаний; l_1 и l_2 – длина подвески соответственно верхней и нижней массы; g – ускорение свободного падения; $n = \alpha/[2(m_1 + m_2)]$, α – коэффициент сопротивления демпфера гасителя.

Декремент колебаний гасителя, характеризующий его демпфирующие свойства, определяют по формуле

$$\delta = n\tau_1 = \frac{\alpha}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{n}\right)^2 - 1}},$$

(2)

где τ_1 – период колебаний гасителя с демпфированием.

При этом τ_1 находят из выражения

$$\tau_1 = \tau_0 \sqrt{\frac{1 + \delta^2}{(4\pi^2)}},$$

(3)

в котором τ_0 – период колебаний гасителя без демпфирования. Из формулы (3) следует, что при $\delta=1$ (наиболее часто встречающаяся величина декремента колебаний реальных гасителей колебаний) τ_1 и τ_0 различаются на 1,26 %. Поэтому для динамических гасителей колебаний влияние демпфирования на период (частоту) колебаний можно не учитывать. Подставляя в (2) выражения для ω и n , получаем

$$\delta = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4gM}{\alpha^2} \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2}\right)}},$$

(4)

где $M=m_1+m_2$. Решив (4) относительно α , имеем

$$\alpha = \frac{\delta}{\pi} \sqrt{gM \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2}\right)}.$$

(5)

Выражение (5) показывает зависимость величины коэффициента трения гасителя колебаний, определяемого конструктивными особенностями и размерами используемых демпферов, от массовых и геометрических параметров гасителя колебаний. Частоту собственных колебаний инерционной массы гасителя можно вычислить из уравнения (1) следующим образом:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{m_1 + m_2} \left(\frac{m_1}{l_1} - \frac{m_2}{l_2}\right)}.$$

(6)

С учетом (6) выражение (5) приведем к виду

$$\alpha = \frac{M\omega\delta}{\pi}.$$

(7)

С помощью выражения (7) можно, например, исследовать зависимость геометрических параметров цилиндров-демпферов гасителей колебаний от величины инерционной массы гасителя M . Решая (7) относительно величины δ , получим

$$\delta = \frac{\pi\alpha}{(M\omega)}.$$

(8)

Зависимость (8) для различных значений M при постоянных α и ω представлена на рис. 5 (кривая 1). При этом величина α принята равной 3330 Н·с/м, что соответствует α для демпфера гасителя колебаний весом 100 кН. Эта величина постоянная для любых значений инерционной массы гасителей колебаний в пределах от 100 до 5 кН. Для гасителя колебаний весом 100 кН принимаем $\omega = 0,17$ Гц, а для других гасителей в диапазоне инерционных масс от 100 до 5 кН величина ω постоянная и равна 0,33 Гц.

Выводы. Из рис. 5 следует, что с уменьшением веса инерционной массы гасителя δ увеличивается сначала медленно, а потом все быстрее: при $P = 10$ кН $\delta = 5$, при $P = 5$ кН $\delta = 10$, декремент колебаний гасителя растет и далее, указывая на переход динамической системы гасителя от колебательной к аperiodической. Таким образом, с уменьшением инерционной массы гасителя усилие демпфирования необходимо снижать. Проще всего, по мнению авторов статьи, это достигается соответствующим уменьшением веса и диаметра цилиндра-демпфера гасителя.

Принимая, что зависимость усилия демпфирования пропорциональна площади поперечного сечения цилиндра-демпфера (или квадрату его диаметра d), на рис. 5 кривая 2 показывает зависимость d от P . Эти результаты необходимо учитывать при разработке и проектировании инерционных гасителей колебаний железнодорожного пути.

Практическое применение предложенного технического решения «Сейсмостойкий успокоитель колебаний железнодорожного пути» позволит снизить сейсмическую нагрузку при магнитуде 7 на 30 %, при магнитуде 6 – на 38 %, при магнитуде 5 – на 43 %. Сокращение усилий при подвижной нагрузке при условии проезда подвижных составов весом брутто до 5000 т будет порядка 50 %.

Список литературы

1. www.wikipedia.org
2. Остроумов Б.В., Гусев М.А., Бутаков А.В. Геометрические параметры демпфирующих устройств динамических гасителей колебаний.