

УДК 624.21.016.7

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-5-9-22](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-5-9-22)

### Теоретические и экспериментальные исследования

Влияние резинометаллических опорных частей на колебания неразрезных железобетонных мостов и путепроводов

Шермухамедов У.З.<sup>1</sup>, Мирзаев И., Каримова А.Б.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ташкентский государственный транспортный университет,  
Ташкент, Республика Узбекистан

**Аннотация:** В статье исследовано влияние типа резинометаллических опорных частей на колебания неразрезных железобетонных мостов на основе расчетов по реальным записям землетрясений. Для решения задачи используются методы конечных элементов и конечных разностей. Представлены результаты расчета нормальных и касательных напряжений, а также продольных и вертикальных перемещений монолитного путепровода от динамической нагрузки по записям двух реальных сейсмограмм. Проведенные расчеты показывают, что пролетное строение опоры путепровода имеют достаточный запас прочности для сильных и очень сильных землетрясений по МСК-64. Для обеспечения гарантированной сейсмической безопасности мостовых сооружений требуется проведение просекных расчетов по наборам записей произошедших землетрясений, близких по доминирующим частотам к характеристикам площадки строительства.

**Ключевые слова:** мосты и путепроводы, сейсмические воздействия, записи реальных землетрясений, сейсмограмма, опорная часть

**Для цитирования:** Шермухамедов У.З., Мирзаев И., Каримова А.Б. Влияние резинометаллических опорных частей на колебания неразрезных железобетонных мостов и путепроводов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 5. С. 9–22. DOI: [10.37153/2618-9283-2022-5-9-22](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-5-9-22)

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда по поддержке сферы сейсмологии, обеспечения сейсмостойкости сооружений и сейсмической безопасности при Кабинете Министров Республики Узбекистан на 2022–2023 гг. по гранту №28/2022 «Создание комплекса программ расчета железобетонных мостов с учетом нелинейного взаимодействия их элементов при реальных сейсмических воздействиях».

### Theoretical and experimental studies

Influence of rubber-metal bearings on vibrations of continuous reinforced concrete bridges and overpasses

Shermukhamedov U.Z.<sup>1</sup>, Mirzaev I.<sup>2</sup>, Karimova A.B.

<sup>1,2,3</sup> Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

@ Шермухамедов У.З., Мирзаев И., Каримова А.Б., 2022

**Abstract:** The effect of the type of rubber-metal bearings on the vibrations of continuous reinforced concrete bridge was calculated based on real earthquake records. To solve problems, the finite element method and finite difference method were used. The results of the calculation of normal maximum stress, and longitudinal and vertical displacements of a monolithic overpass under dynamic load based on the records of two real seismograms, are presented. The calculations performed show that the span structure and supports of the overpass have a sufficient margin of safety in the event of strong and very strong earthquakes according to MSK 64. To ensure the guaranteed seismic safety of bridge structures, it is required to conduct design calculations based on sets of records of past earthquakes that are close in dominant frequencies to the characteristics of the construction site.

**Keywords:** bridges and overpass, seismic protection, real earthquake records, seismogram, bearing

**For citation:** Shermukhamedov I.Z., Mirzaev I., Karimova A.B. Influence of rubber-metal bearings on vibrations of continuous reinforced concrete bridges and overpasses. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 5, pp. 9–22 (in Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2022/5/22](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022/5/22)

**Acknowledgment:** The work was carried out by the Foundation with the support of the field of seismology, seismic resistance of structures and seismic safety under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan for 2022–2023 under grant No. 28/2022 “Creation of a set of programs for calculating railway bridges, taking into account the nonlinear interaction of their elements under real seismic effects”.

#### Введение

Сильные землетрясения (с интенсивностью 7 баллов и более) могут вызвать большие деформации, а иногда и разрушения. Для предотвращения таких последствий мосты должны иметь способность рассеивать энергию при колебаниях вследствие внутреннего конструкционного трения в материале, из которого они изготовлены, или неупругих деформаций [1]. Как известно, в Узбекистане значительная часть строительства приходится на сейсмически опасные районы. Защита сооружений от сейсмических воздействий является немаловажной задачей проектиста. Исследование мирового опыта в сфере сейсмозащиты мостов показывает, что использование принципа сейсмоизоляции имеет широкое применение. При данном методе между опорами и пролетными строениями устанавливаются подвижные (резинометаллические) или скользящие опорные части, работающие в качестве сейсмоизолирующего элемента.

Следует отметить, что в настоящее время опубликовано около двадцати монографий по вопросам сейсмоизоляции и сейсмозащиты местных сооружений. Классификации сейсмоизолирующих устройств приведены в [2–7]. В работах [6, 7] рассмотрены вопросы сейсмоизоляции и сейсмозащиты мостов, учета особенностей сейсмических колебаний мостов, оценки сейсмических нагрузок, а также влияния расчетного воздействия и коэффициентов сочетаний сейсмической и подвижной нагрузок.

При горизонтальном возбуждении сейсмическими воздействиями по двум направлениям применяются резинометаллические опорные части – шарниры, которые устанавливаются в неразрезных балочных мостах. Нелинейная реакция которых приведена в работах [8, 9]. На вибростенде были проведены лабораторные испытания модели изолированных мостов, конструкция которых включала неразрезные пролетные строения и опорные части LRB.

Также приведены результаты проведенных испытаний при воздействии соответствующих нагрузок, которые были сравнены с экспериментальными данными. В результате обнаружено различие перемещений различных типов опорных частей, которое возникает при реализации восстанавливающей силы в продольном и поперечных направлениях резинометаллических опорных частей. Исходя из этого учитывается двунаправленное взаимодействие LRB при сейсмоизоляции мостовых конструкций.

Авторами работ [10–13] проведен анализ влияния опорных частей на работу моста при сейсмических воздействиях, а также разработаны эксплуатационные программы свинцово-резиновых опорных частей. Дополнительное изолирование основания моста и корректный подбор параметров моделирования оказывают значительное влияние на сейсмическую реакцию конструкции при моделировании LRB. В работе также исследовано влияние продолжительности движения грунта при дополнительном изолировании основания моста.

Сильное движение грунта приводит к нестабильности и неспособности восстановления при значительном движении грунта, что приводит к трещинам при приложении обычных резино-свинцовых опорных частей из-за малой жесткости резины. Решение данной проблемы приведено в работах [14, 15], где предлагается использование металлических листов, встроенных в эластомерную опору. Применяемые в данном способе сплавы (SMA) позволяют успешно снизить пиковые и остаточные смещения мостов в период сильных сейсмических воздействий.

В последнее время в качестве сейсмического воздействия выбирают сейсмограммы записей землетрясений [16, 17]. В этой связи представляет интерес разработка методов и программных средств для проведения расчетов мостов и путепроводов на действие землетрясений на основе имеющихся записей сейсмограмм.

Проведение расчетов на основе имеющихся реальных записей сейсмограмм [18], зарегистрированных во время сильных землетрясений, хранящихся в известных базах данных Европы и США, позволяет в кратчайшие сроки и в малом масштабе времени изучить поведение конструкций, а также оценить прочностные элементы рассчитываемых мостов и путепроводов. Такой подход обеспечивает гарантированную оценку надежности мостов и путепроводов при сейсмических воздействиях имеющей определенную интенсивность на площадке строительства. Так как рассчитываемый мост оборудуется средствами сейсмозащиты с нелинейными свойствами, то расчет необходимо производить прямым динамическим методом.

В этой связи, в статье рассматривается влияние типа резинометаллических опорных частей на колебания неразрезных железобетонных мостов и путепроводов по данным реальных землетрясений в условиях Республики Узбекистан.

**Задачи исследования** таковы: провести обзор литературных источников по выбору резинометаллических опорных частей железобетонных балочных мостов с разными статическими схемами; проанализировать максимальные и минимальные значения нормальных напряжений в элементах конструкции при сильных землетрясениях; найти максимальные вертикальные перемещения пролетного строения путепровода при реальных прошлых землетрясениях; выбрать тип резинометаллических опорных частей на основе анализа колебаний неразрезных железобетонных мостов и путепроводов по записям реальных землетрясений; разработать практические рекомендации по выбору резинометаллических опорных частей неразрезных железобетонных мостов и путепроводов по записям реальных землетрясений.

## Методы исследования

Вследствие сложности конструкций мостов и пространственного характера сейсмического воздействия, аналитические методы расчета их напряженно-деформированного состояния представляются невозможными. Поэтому применяются численные методы решения задач. Воздействие задается в виде ряда записей сейсмограмм по трем направлениям с корректировкой амплитуды на разницу в их амплитудность. Уравнение движения конструкции после применения дискретизации по методу конечных элементов приводится к виду [19, 20]

$$[M]\{\ddot{u}\} + \eta[C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}, \quad (1)$$

с начальными условиями из физического решения задачи

$$\{u(t)\}_{t=0} = \{u(0)\}, \quad \{u(t)\}_{t=0} = \{\dot{u}(0)\}, \quad (2)$$

где  $\{u(t)\}$  – вектор абсолютных перемещений узловых точек конечно-элементной модели конструкции,  $[M]$  – матрица масс системы, структура которой зависит от распределения массы в конструкции,  $[C]$  – матрица демпфирования, элементы которой вычисляются по значениям вязкости в элементах конструкции и в резинометаллических опорных частях,  $[K]$  – матрица жесткости конструкции. В случае нелинейных задач матрицы  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  зависят от вектора абсолютного перемещения, в  $\{P(t)\}$  входят заданное движение грунта и действующие внешние силы. Движение грунта задается в виде записей сейсмограмм [19, 20].

Сейсмическое воздействие передается конструкции через опоры в виде равенства перемещений фундаментов опор и поверхности основания с учетом распространения сейсмической волны.

На основе решения задачи с соответствующими граничными условиями на торцах пролетного строения вычисляются перемещения и повороты узловых точек по всей конструкции. Затем по соответствующим формулам вычисляются на каждом шаге по времени усилия, моменты сил во всех элементах конструкции и нормальные напряжения в элементах пролетного строения.

В работе было рассмотрено два типа резинометаллических опорных частей:

- изоляторы со свинцовым сердечником серии LRB;
- резинометаллические изоляторы серии SI- (normal).

Изоляторы со свинцовым сердечником серии LRB представляют собой резинометаллические опорные части, состоящие из стальных пластин, чередующихся со слоями резины, выполненные с цилиндрическим свинцовым сердечником (рис. 5). Рассеивание энергии обеспечивается свинцовым сердечником при его пластических деформациях, позволяя достигать значений коэффициента эквивалентного вязкого демпфирования порядка 30%. Благодаря высокой способности к рассеиванию энергии, становится возможным увеличение горизонтальных перемещений по сравнению с системой изоляции, обладающей такой же эквивалентной жесткостью, но меньшей способностью к рассеиванию энергии [7, 21].

Изолятор LRB изготовлен из резиновой смеси с  $E = 0,1$  МПа, диаметр 260 мм, резиновыми слоями толщинами и со свинцовым сердечником диаметром 60 и 185 мм. Типичная петля гистерезиса изоляторов серии LRB может быть представлена как билинейная. Параметры  $d$ ,  $F_d$ ,  $d_1$  и  $F_2$ , характеризующие билинейную кривую, приведены для каждого изолятора серии LRB, приведенных в таблице 1 на рис. 1 [21].

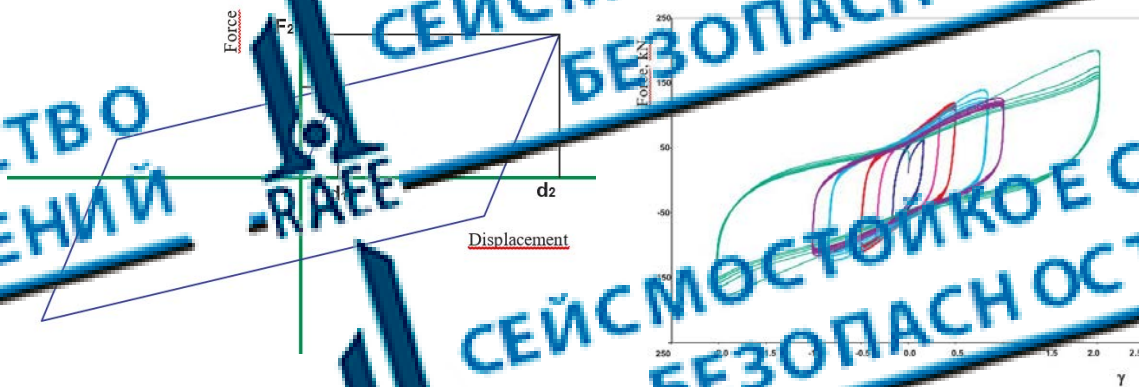


Рисунок 1 – Типичные гистерезисные петли резинометаллического изолятора со свинцовым сердечником, полученные при динамических испытаниях с увеличением амплитуды деформации сдвига

Figure 1 – Typical hysteresis loops of a lead rubber isolator obtained in dynamic tests with increasing amplitude of shear

Гистерезисное поведение изолятора серии LRB может также изображаться в виде однолинейного графика, с эффективной жесткостью  $K_e$  и коэффициентом эквивалентного вязкого демпфирования  $\xi_e$ , зависящих от максимального смещения  $d_2$  и соответствующей силы  $F_2$ , к которой они относятся [21]:

$$K_e = \frac{F_2}{d_2}; \quad (3)$$

$$\xi_e = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{F_1 - d_1}{F_2 - d_1} \right]; \quad (4)$$

где  $K_e$  – эффективная горизонтальная жесткость (при смещении  $d_2$ );  
 $\xi_e$  – коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования (при смещении  $d_2$ );  
 $F_2$  – максимальная горизонтальная сила (при смещении на значение  $d_2$ );  
 $F_1$  – предел сопротивления, предел текучести;  
 $d_1$  – перемещение до предела текучести.

Второй тип изолятора – изоляторы серии SI представляют собой резинометаллические опорные части, состоящие из стальных пластин, чередующихся со слоями резины, объединенные методом горячей вулканизации. Как правило, SI изготавливаются круглой формы, но также могут изготавливаться квадратными или прямоугольными в плане. Резиноталлические изоляторы обозначаются SI (Seismic Isolator) с последующим указанием одной из букв S (Soft – мягкая), N (Normal – нормальная) и H (Hard – жесткая) [7, 21].

Резиновые смеси, применяемые для производства SI, имеют эквивалентный динамический модуль сдвига  $G_{din}$  от 0,4 МПа до 1,4 МПа и коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования равный 10% или 15%.

Для проектирования неразрезного монолитного участка с учетом сейсмоизоляции выполнено вариантное сравнение двух изоляторов. Параметры  $K_e$ ,  $\xi_e$ ,  $K_v$ ,  $F_1$ ,  $d_1$  и  $F_2$ , характеризующие билинейную кривую, приведены для одного изолятора серии LRB-SN и SI-N в таблице 1, приведены для двух резинометаллических опорных частей [21].

Таблица 1 – Исходные параметры резинометаллических изоляторов серий LRB-SN и SI-N с разными допустимыми перемещениями

Table 1 – Initial parameters of rubber-metal insulators of the LRB-SN and SI-N series with different permissible displacements

Допустимое перемещение, мм	Тип изолятора	$K_e$	$\epsilon_e$	$F$	$F_1$	$K_v$	$D$
		кН/мм	%	кН	кН	Н/мм	мм
200	LRB-SN 900/144-160	3.83	22	639	241	3309	900
250	LRB-SN 900/171-160	3.49	22	728	312	2892	
300	LRB-SN 900/192-160	2.27	21	817	312	2892	
400	SI-N 900/108	4.71	Изолятор без свинцового сердечника			4177	
250	SI-N 900/132	3.86				3582	900
300	SI-N 900/168	3.03				2814	

**Результаты расчета**

Рассмотрим железобетонный моститный путепровод, проходящий на 1083 км автодороги М-39 в город Самарканде, выполненный в виде двух отдельно стоящих путепроводов, каждый под одно направление движения. Пролетное строение путепровода выполнено неразрезной монолитной железобетонной расчетной схемой 31 м+42 м+33 м и индивидуальном проектировании, длиной 10 м и шириной 10,5 м, имеет переменную высоту вдоль путепровода. По фасаду пролетное строение выполнено плитами переменной высоты – 1,3 м в пролете, 2,3 м над опорой (рис. 2).

Конструкция путепровода разбивается на конечные элементы с учетом изменения высоты по длине пролетного строения. Каждый элемент моделирует осевое растяжение-сжатие, изгиб относительно перпендикулярных осей и продольной оси путепровода и кручение относительно продольной оси [22].

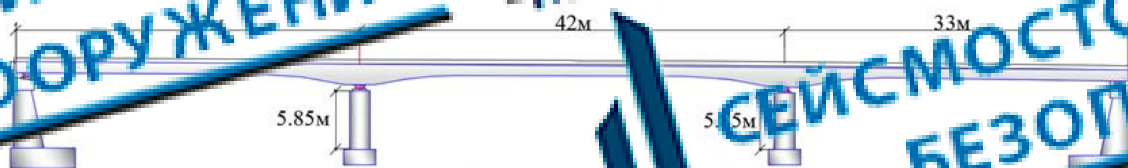


Рисунок 2 – Схема монолитного путепровода, проходящего на 1083 км автомобильной дороги М-39

Figure 2 – Scheme of a monolithic overpass at 1083 km of the M-39 highway

Мостовые сооружения состоят из многих составных элементов, наиболее ответственными из них являются пролетные строения, опоры и опорные части [17, 23]. Опора и опорная часть являются самыми уязвимыми элементами мостового сооружения. Таким образом, для опорной части в сейсмических районах используют сейсмоизолирующие устройства, в частности резиноталлические. Опорная часть является сейсмоотражающим резиноталлическим устройством и позволяет пролетному строению перемещаться в продольном направлении в пределах от 0,1 м до 0,35 м в зависимости от используемых моделей за счет малой жесткости на сдвиг [23, 24].

Опорная часть моделируется в виде одного конечного элемента, работающего на растяжение-сжатие, в том числе по двум направлениям и кручению. Промежуточные опоры имеют размеры: высота 5 м, ширина по фасаду – 2 м, а по боковому направлению имеет переменный размер по высоте от 5 м до 8,4 м. Опоры разбиваются на конечные элементы, работающие на растяжение-сжатие, сдвиг по двум направлениям и кручение, с учетом распределенности массы. В данном расчете принимаем движения их оснований равными движению основания в соответствующих точках во время землетрясения. Материал составных конструкций – бетон класса В35 по прочности, с удельным весом  $\gamma = 25000 \text{ Н/м}^3$ , модулем упругости  $E = 31200 \text{ МПа}$ , коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,1$ . Сейсмичность территории Самарканда принята 8 баллов по карте сейсмического микрорайонирования, выполненной Институтом сейсмологии в 1999 г.

Рассмотрим поведение стержневого путепровода с сейсмоизоляцией фирмы «FIP-Industriale» при землетрясении различной силы и повторяемости. Данная сейсмоизоляция представляет собой систему опорных пролетных строений на продольно-подвижные опорные части. Начало путепровода – левый торец пролетного строения – жестко соединено с устоем, а конец путепровода – правый торец – соединен с устоем с подвижными опорными частями.

В работе представлены результаты расчетов монолитного путепровода от динамической нагрузки по записям двух реальных сейсмограмм опасных землетрясений: Табасское (Иран) и Кайрано (Италия) [19].

1. Cairano – 000312 (16.01.1981, 8 баллов по МСК-64, максимальное ускорение –  $1,47 \text{ м/с}^2$ , максимальное перемещение –  $0,071 \text{ м}$ , период цифровки –  $0,005 \text{ с}$ , длительность –  $22,175 \text{ с}$ );

2. Tabas – 000187 (16.09.1978, выше 10 баллов по шкале МСК-64, максимальное ускорение –  $10,17 \text{ м/с}^2$ , максимальное перемещение –  $0,3446 \text{ м}$ , период цифровки –  $0,005 \text{ с}$ , длительность –  $78,395 \text{ с}$ ).

В таблицах 2 и 3 приведены результаты вычисления максимальных по абсолютным значениям нормальных напряжений в верхнем и нижнем участках пролетных строений монолитного путепровода. Расчеты выполнены в программе расчета конструкций SHARK [20].

Анализ максимальных и минимальных значений нормальных напряжений при 10 и 8 балльных землетрясениях показал, что конструкция путепровода выдерживает сильные и очень сильные землетрясения. По нормам проектирования допустимое значение напряжений составляет  $2,73 \text{ МПа}$ .

Таблица 2 – Нормальные максимальные напряжения в верхнем участке пролетных строений монолитного путепровода при сейсмических воздействиях прошлых землетрясений

Table 2 – Normal maximum stresses in the upper section of span structures of a monolithic overpass under seismic impacts from past earthquakes

Тип опорной части с разными перемещениями	Наименование воздействия	Максимальные напряжения, МПа					
		в середине левого пролета (16.5 м)		в середине путепровода (54 м)		в середине правого пролета (91.5 м)	
		Статика	Динамика	Статика	Динамика	Статика	Динамика
LRB-SN (200 мм)	Cairano	-0.04815	0.12633	-0.08188	0.02991	-0.061171	-0.032722
	Tabas	-0.048152	0.12633	-0.08188	0.99005	-0.061171	0.27594
LRB-SN (210 мм)	Cairano	-0.047916	0.12634	-0.082342	0.029208	-0.061281	-0.032674
	Tabas	-0.047916	0.12634	-0.082342	0.99705	-0.061281	0.28779
LRB-SN (300 мм)	Cairano	-0.047916	0.12607	-0.082342	0.029058	-0.061281	0.03284
	Tabas	-0.047916	0.12607	-0.082342	0.99097	-0.061281	0.27732
SI-N (200 мм)	Cairano	-0.048649	0.12604	-0.081699	0.02899	-0.061215	-0.033814
	Tabas	-0.048649	0.12604	-0.081699	0.97082	-0.061215	0.26142
SI-N (250 мм)	Cairano	-0.048195	0.12608	-0.081842	0.028587	-0.061165	-0.033766
	Tabas	-0.048195	0.12608	-0.081842	0.9598	-0.061165	0.25565
SI-N (300 мм)	Cairano	-0.047645	0.12617	-0.082188	0.027657	-0.061167	-0.033881
	Tabas	-0.047645	0.12617	-0.082188	0.94766	-0.061167	0.24972

Таблица 3 – Нормальные максимальные напряжения в нижнем участке пролетных строений монолитного путепровода при сейсмических воздействиях прошлых землетрясений

Table 3 – Normal maximum stresses in the lower section of span structures of a monolithic overpass under seismic impacts from past earthquakes

Тип опорной части с разными перемещениями	Наименование воздействия	Максимальные напряжения, МПа					
		в середине левого пролета (16.5 м)		в середине путепровода (54 м)		в середине правого пролета (91.5 м)	
		Статика	Динамика	Статика	Динамика	Статика	Динамика
LRB-SN (200 мм)	Cairano	0.045901	0.23169	0.07967	0.19604	0.05961	0.09983
	Tabas	0.045901	1.6905	0.07967	0.4325	0.05961	0.41064
LRB-SN (250 мм)	Cairano	0.045667	0.22115	0.080134	0.19626	0.059703	0.099983
	Tabas	0.045667	1.7273	0.080134	1.1614	0.059703	0.41634
LRB-SN (300 мм)	Cairano	0.045667	0.22838	0.080134	0.19602	0.059723	0.099792
	Tabas	0.045667	1.7299	0.080134	1.1549	0.059723	0.41205
SI-N (200 мм)	Cairano	0.045861	0.22976	0.078989	0.1987	0.059362	0.098003
	Tabas	0.045861	1.7066	0.078989	1.294	0.059362	0.39407
SI-N (250 мм)	Cairano	0.045916	0.23205	0.079618	0.194	0.059594	0.098853
	Tabas	0.045916	1.6921	0.079618	1.191	0.059594	0.38807
SI-N (300 мм)	Cairano	0.045863	0.227666	0.080438	0.1939	0.059871	0.098577
	Tabas	0.045863	1.6719	0.080438	1.1088	0.059871	0.38188

Как видно из таблицы 3, максимальное растягивающее напряжение в левом пролете путепровода с жесткими опорными частями составляет 1.7373 МПа. Это связано с тем, что жесткая опорная часть передает энергию сейсмической волны непосредственно первому пролету. Отметим, что при расчете применены резинометаллических опорных частей со свинцовым сердечником в трех опорах путепровода, а также потерей энергии в пролетных строениях. Вследствии этого, напряжения снижаются в 1.5 и 4 раза соответственно в среднем пролете (1.1614 МПа) и в правом пролете (0.41654 МПа), по сравнению с напряжением в левом пролете.

Результаты сопоставления напряжений при статическом и динамическом нагружениях показывает, что при использовании резинометаллических опорных частей со свинцовым сердечником перемещение 250 мм) на путепровод при Табасском землетрясении, максимальные значения динамических напряжений в нижних участках пролетного строения путепровода значительно больше чем статическое, т.е. в левом пролете в 37 раз, в среднем пролете в 17 раз и в правом пролете в 6 раз. По землетрясению Кайрано можно видеть, что в левом пролете динамика в 5 раз больше чем статика, соответственно в среднем и правом пролете в 2 раза, так как это землетрясение является 8-балльным по шкале MSK-64.

Результаты сравнения двух типов опорных частей путепровода при различных допустимых перемещениях по землетрясениям Табас и Кайрано показали, что целесообразно использовать сейсмический изолятор LRB-SN (250 мм) с большей жесткостью, так как этот тип изолятора имеет наибольший коэффициент демпфирования. Увеличенный коэффициент демпфирования в принципе увеличивает общую жесткость изолятора при динамических воздействиях, но приводит к затуханию колебаний.

На рисунке 3 представлены результаты изменения во времени вертикального перемещения пролетного строения в середине путепровода (Табасское землетрясение) с разными марками резинометаллических опорных частей. Здесь обозначены вертикальные перемещения монолитного путепровода в среднем участке 54 м от начала тупика. Максимальное перемещение оказалось равным 0.0618 м при LRB-SN (250 мм) и 0.0632 м при SI-N (250 мм).

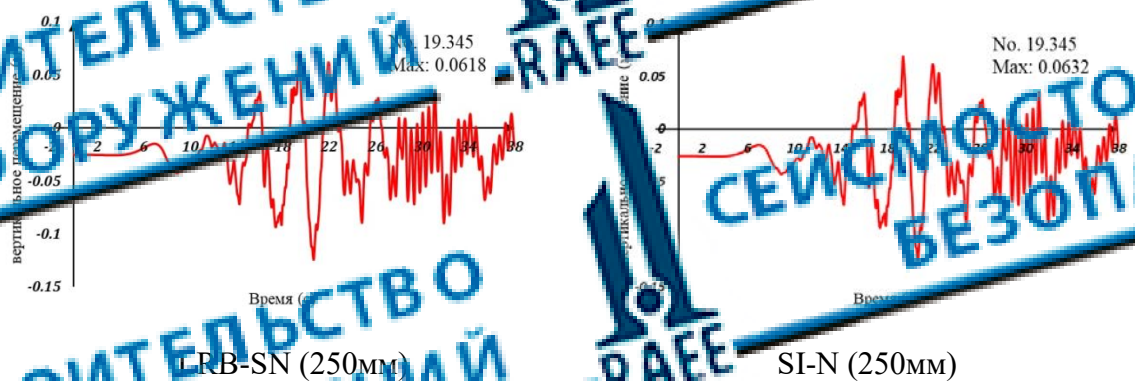


Рисунок 3 – Изменение во времени вертикального перемещения пролетного строения в середине путепровода (Табасское землетрясение) с разными резинометаллическими опорными частями

Figure 3 – Change in time of the vertical displacement of the span in the middle of the overpass (during the Tabas earthquake) with different types of rubber-metal bearings

На рисунке 4 приведено продольное перемещение правого конца путепровода, который является свободным от продольного напряжения, а также перемещение соответствующего

устоя от активного давления грунта при Табасском землетрясении. Следует отметить, что относительное перемещение по сравнению с перемещением опоры на правом торце путепровода для различных марок изоляторов почти одинаково. Это связано с тем, что свдиговые жесткости изоляторов сравнительно малы, и из-за этого их влияние на продольные колебания пролетного строения незначительны. Продольное перемещение путепровода формируется на основе перемещения его левого торца, так как пролетное строение имеет большую продольную жесткость и, соответственно, большую скорость распространения волны по сравнению со скоростью распространения волны в грунте. Этим и объясняется относительное максимальное значение перемещения.

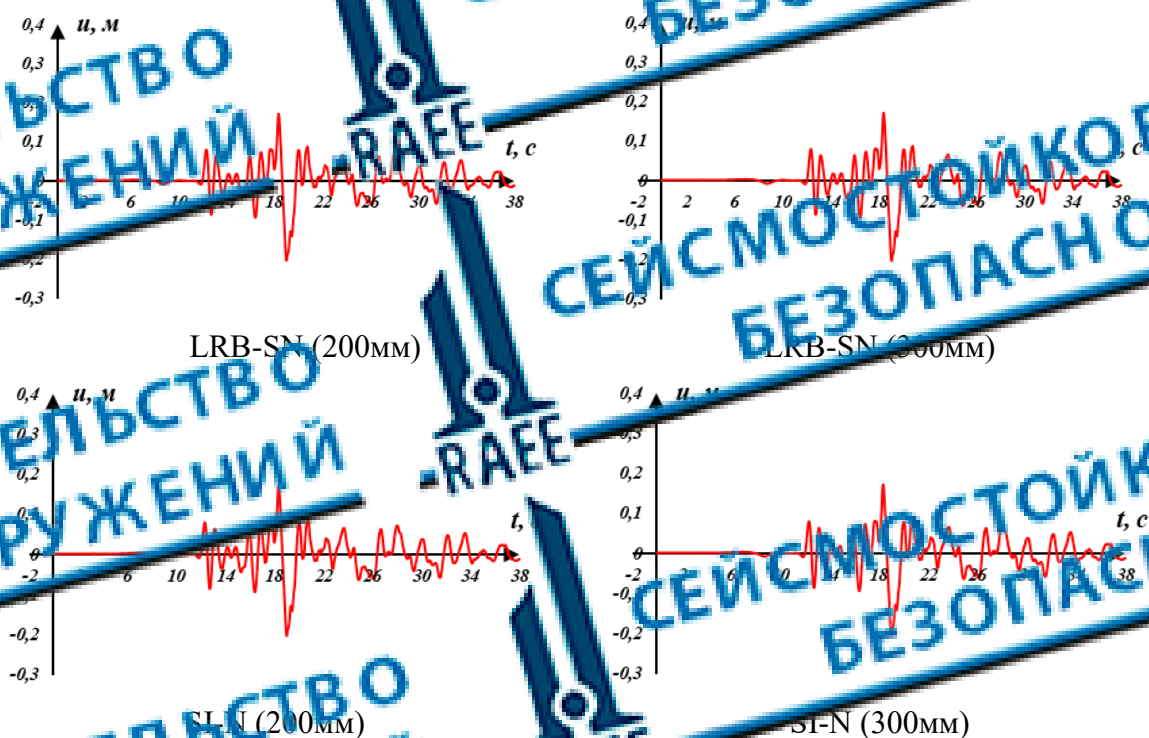


Рисунок 4 – Изменение во времени продольного перемещения правого конца пролетного строения путепровода относительно опоры с разными резинометаллическими опорными частями (Табасское землетрясение) ( $U_{max}=0.2022\text{ м}$ )

Figure 4 – Change in time of the longitudinal movement of the right end of the span structure of the overpass relative to the support with different rubber-metal bearing parts (the Tabas earthquake) ( $U_{max}=0.2022\text{ m}$ )

Из графика видно, что максимальное продольное перемещение составляет 0.2022 м при использовании резинометаллических опор в запись Табасского землетрясения. В этой связи целесообразно применить опорные части с перемещением (300 мм). Упущена тот факт, что интенсивность землетрясения Табас 10 баллов, возможно применить сейсмические опорные части с перемещением 200 мм в сейсмических условиях Республики Узбекистан.

#### Выводы

Полученные результаты нормальных напряжений в пролетных строениях при воздействии очень сильных землетрясений показывают, что они не превышают

допустимых значений норм проектирования.

Результаты сравнения двух типов опорных частей путепровода при различных допустимых перемещениях по записям землетрясения показали, что целесообразно использовать сейсмический изолятор LRB-SM (250 мм) с большей жесткостью, так как этот тип изолятора имеет наибольший коэффициент демпфирования. Увеличенный коэффициент демпфирования в принципе увеличивает общую жесткость изолятора при динамических воздействиях, но приводит к затуханию колебаний.

По результатам сравнения перемещений правого торца путепровода и соответствующей опоры, приходим к заключению, что наиболее эффективным способом сейсмозащиты путепровода с пера балочным троллейным строением оказалось использование резинометаллических опорных частей со сплошным сердечником (перемещение 2,0 мм), которые обладают достаточным демпфированием для гашения колебаний конструкции в результате сейсмических воздействий.

#### Список литературы

1. Шермухамедов У.З., Кадимова Ш.Ш. Выбор опорных частей мостов в сейсмических районах // *Проблемы механики*. ИМГиС, Ташкент. 2015. (1) 59–62.
2. Верховин В.А. Особенности расчета и подбора параметров сейсмоизоляции мостов // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2004. №2. С. 44–48.
3. Уздин А.М., Саидович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. Изд. ВНИИГ, С.-Петербург. 1993. 175 с.
4. Шестогоров Г.С. Обзорная информация. Антисейсмические устройства в мостостроении. М.: ВНИИТРАНССТРОЙ. 1986. 46 с.
5. Skinner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H. An introduction to seismic isolation. John Wiley & Sons. New Zealand. 1993, 353 p.
6. Уздин А.М., Кузнецова И.О. Сейсмостойкость мостов. Palmarium Academic Publishing. 2014. 456 с.
7. Шермухамедов У.З. Гашение продолжительных сейсмических колебаний опор балочных мостов с сейсмоизолирующими опорными частями. монография. Ташкент. 2020. 180 с.
8. Qiang Han, Jianlai Wen, Xiuli Du. Nonlinear response of continuous girder bridges with isolation bearings under bidirectional ground motions. *Journal of Vibroengineering*. Beijing University of Technology, Beijing, China. 2015, Vol. 17, Issue 2, 116–126.
9. Ju Oh, Jin Ho Kim, Seung Chul Han. An experimental study on the shear property dependency of high-damping rubber bearings. *Journal of Vibroengineering*. 2017, Vol. 19, Issue 8, 6208-6221. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18.12>
10. Yumin Zhang, Jiawu Li, Jingbo Wang, and Hui Wu. Study on the Seismic Performance of Different Combinations of Rubber Bearings for Continuous Beam Bridges. *Advances in Civil Engineering*. 2020, no. 4, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1155/2020/8810874>
11. Wang Shuai, Heisha Gu, Han Wen, Yu Fang, Guo Xiang. Seismic Response Analyses of Isolated Bridges with Different Isolation Bearings. *Journal Advanced Materials Research*. Volume (January). 2012, pp. 446–449.
12. Aghaeidoust Vahid, Billah Muntasir. Effect of lead rubber bearing (LRB) modeling technique on the seismic response of base-isolated bridges. 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Streamed from Athens, Greece. 2011, June, 3930–3941.
13. Shakeri Soleimani Hossein, Barkhordari Mohammad Ali. Mechanical Characteristics and Application of Fiber-reinforced Elastomeric Bearings for Seismic Isolation and Retrofitting of Bridge. *Trends in Applied Sciences Research*. 2014, Volume 7 Issue 1, pp. 31–42.

14. Choi E., Nam T.H., Oh J.H., Cho B.S. An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2006, 25 November. Volumes 438: 1081–1084. doi:10.1016/j.msea.2006.05.098

15. Orbulut O.E., Haribolus S. Energy-balance assessment of shape memory alloy-based seismic isolation devices. *Smart Structures and Systems*. 2011, Volume 8, Issue 4. 399–412.

16. Mirzaev I., Yuvnityev A., Turdiev M., Shomurodov J. 2021. Influence of the Vertical Earthquake Component on the Shear Vibration of Buildings on Shallow Foundations. E3S Web of Conferences 264, 02022. COMECHYDRO. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2021175402022>.

17. Kosimov E., Mirzaev I., Bekmirzaev I. 2021. Comparison of the impacts of harmonic and seismic waves on an underground pipeline during the Gazli earthquake. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 1030. 012022. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012022.

18. Ambraseys N.N., Smith C., Douglas J., Margaris B., Sigbjörnsson, R., Ólafsson S., Suhadolc P., Costa G. 2004. Intensity scale for European strong-motion data. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* 41(3). URL: [http://www.isesd.hi.is/ESD\\_local/Tran\\_suk.htm](http://www.isesd.hi.is/ESD_local/Tran_suk.htm).

19. Shermukhamedov U., Shaumarov S., Uzdin A. 2021. Use of seismic insulation for seismic protection of railway bridges. In E3S Web of Conferences (vol. 264, p. 02011). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/202126411001

20. Рашидов Т.Р., Кузнецов С.Л., Мордочов Б.М., Мирзаев И. 2019. Прикладные задачи сейсродинамики сооружений. Книжное издательство, Ташкент. 238 с.

21. <http://www.fir-industriale.it>.

22. Мяченко В.И., Мальцев В.И., Майборода В.П. и др. 1989. Расчёт машиностроительных конструкций методом конечных элементов. Справочник. Под общ. ред. Мяченко В.И. Москва: Машиностроение. 520 с.

23. Rashidov T.R., Rashidov T., Shermukhamedov U. 2020. Features of the theory of a two-mass system with a rigidly connected end of the bridge, in consideration of seismic influence on high-speed railways. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine* 7(2), 1160–1166

24. Shermukhamedov U., Shaumarov S. 2020. Impact of configuration errors on the dynamic oscillation absorbers effectiveness of different masses on the seismic resistance of bridges. In E3S Web of Conferences, Vol. 97, p. 03017. EDP Sciences.

#### References

1. Shermukhamedov U.Z., Kadyrova Sh.Sh. Selection of bridge bearings in seismic regions. *Problems of Mechanics*. IMISS, Tashkent, 2015, (2), 51–62. (In Russian)

2. Verkhovlin V.A. Peculiarities of calculation and selection of bridge seismic isolation parameters. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2004, no. 2, pp. 44–48. (In Russian)

3. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al-Nasser-Muhammad Samih Amin. Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-resistant construction of buildings and structures. Publishing House VNIIG, St.-Petersburg, 1993. 175 p. (In Russian)

4. Slesoperoov G.S. Review information. Antiseismic devices in bridge building. M. VPIITRANSSTROY. 1986. 46 p. (In Russian)

5. Skene R.L., Robinson W.H., McVerry G.H. An introduction to seismic isolation. John Wiley & Sons, New Zealand. 1993, 353 p.

6. Uzdin A.M., Kuznetsova I.O. Seismic resistance of bridges. Palmarum Academic Publishing. 2014. 456 p. (In Russian)

7. Shermukhamedov U.Z. Damping of longitudinal seismic vibrations of girder bridge supports with seismic isolation bearings. Monograph. Tashkent, 2020. 180 p. (In Russian)

8. Qiang Han, Jianjun Wen, Xuli Du. Nonlinear response of continuous girder bridges with isolation bearings under bidirectional ground motions. *Journal of Vibroengineering*. Beijing University of Technology, Beijing, China. 2015. Vol. 17, Issue 2, 816–826.
9. Jeon Oh, Jin Ho Lee, Seung Chul Han. An experimental study on the shear property dependency of high-damping rubber bearings. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, Issue 8, 6208–6221. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18652>
10. Yumin Zhang, Jiawu Li, Lingbo Wang, Hao Wu. Study on the Seismic Performance of Different Combinations of Rubber Bearings for Continuous Beam Bridges. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2020. *Advances in Civil Engineering*. 2021, no.4, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2020/811174>
11. Wang Shuai, Heisha, Guo Wen Yu, Fan, Wang, Guo Yang. Seismic Response Analyses of Isolated Bridges with Different Isolation Bearings. *Advanced Materials Research*. Volume January. 2012, pp. 446–449.
12. Aghaeidoost Mahid, Binafshani. Effect of lead rubber bearing (LRB) modeling technique on the seismic response of base-isolated bridges. 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Streamed from Athens, Greece. 2021, June. 3930–3941.
13. Shakeri Soleimanloo Hosseini, Markhordaji Mohammad Ali. Mechanical Characteristics and Application of Fiber-reinforced Polymeric Bearings for Seismic Isolation and Retrofitting of Bridges. *Trends in Applied Science Research*. 2014, Volume 9, Issue 1, 31–42.
14. Choi E., Nam T. H., Oh J.T., Cho D. An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2006. Volume 438–440, 25 November, 1081–1084. doi: 10.1016/j.msea.2006.05.098
15. Ozbilut O. E., Hurlbaus S. Energy balance assessment of shape memory alloy-based seismic isolation devices. *Smart Structures and Systems*. 2011, Volume 8, Issue 4, 399–412.
16. Mirzaev I., Yuvmitov Anvar, Turdiev Valikjon, Shorurodov Jakhongir. 2021. Influence of the Vertical Earthquake Component on the Shear Vibration of Buildings on Sliding Foundations. *E3S Web of Conferences* 264, 01021. CONMECHYDRO. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20212640201>
17. Elbek Kosimov, Ibrakhim Mirzaev and Otabek Bekmirzaev. 2021. Comparison of the impacts of harmonic and seismic waves on an underground pipeline during the Gazli earthquake. *ICM Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1030. 012082 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-1030/1/012082.
18. Anbraseys N.N., Smit P., Douglas J., Margaris B., Sigbjörnsson R., Ólafsson S., Sebaldic P., Costa G. 2004. Internet site for European strong motion data. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 45(3). URL: [http://www.iseis.dfn.it/ESD\\_local/frenchse.html](http://www.iseis.dfn.it/ESD_local/frenchse.html).
19. Shermuxamedov U., Shaumarov S., Uzdin U. 2021. Use of seismic isolation for seismic protection of railway bridges. *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 02001). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/202126402001.
20. Rashidov R., Kuznetsov S.V., Mardonov B.D., Mirzaev I. 2019. Applied problems of seismodynamics of structures. Book 1. Nowruz, Tashkent. 268 p. (In Russian)
21. <http://www.wrl.in.tu.italy.it>
22. Myachenkov V.I., Matsev V.G., Mayboroda V.P. et al. 1989. Calculation of machine-building structures by the finite element method. Directory Under trial ed. Myachenkov, V.I. Moscow, Engineering. 520 p. (In Russian)
23. Rashidov T. R., Rashidov T., Shermuxamedov U. 2020. Features of the theory of a two-mass system with a rigidly connected end of the body in consideration of seismic influence on high-speed railways. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*, 7(2), 1160–1166.

24. Shermukhamedov I., Shakhmurov S. 2019. Impact of configuration errors on the dynamic oscillation absorbers effectiveness of different masses on the seismic resistance of bridges. In E3S Web of Conference, Vol. 97, p. 03017. EDP Sciences

Данные об авторах / Information about authors

**Шермухамедов Улугбек Забишуллаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели», Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан [ulugbekjuve@mail.ru](mailto:ulugbekjuve@mail.ru), +998903161181

**Shermukhamedov Ulugbek Z.** Professor of the Department of "Bridges and tunnels", Dr. Sci. (Engineering), Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan [ulugbekjuve@mail.ru](mailto:ulugbekjuve@mail.ru), +998903161181

**Мирзаев Ибрахим**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная механика», Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан [ibrakhim\\_mir@mail.ru](mailto:ibrakhim_mir@mail.ru), +998909388017

**Mirzaev Ibrakhim**, Professor of the Department of Applied Mechanics, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan [ibrakhim.mir@mail.ru](mailto:ibrakhim.mir@mail.ru), +998909388017

**Каримова Анора Бахтиёровна**, ассистент кафедры «Мосты и тоннели», Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан [anorakarimovabaxtiyorovna@gmail.com](mailto:anorakarimovabaxtiyorovna@gmail.com), +998909904443

**Karimova Anora B.** assistant of the Department of "Bridges and tunnels", Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan [anorakarimovabaxtiyorovna@gmail.com](mailto:anorakarimovabaxtiyorovna@gmail.com), +998909904443