

УДК 624.042.7

**И. О. Кузнецова, С. С. Ваничева, М. В. Фрезе,
А. А. Долгая, Т. М. Азаев, Х. Р. Зайнулабидова**

ПРИМЕНЕНИЕ ФРИКЦИОННО-ПОДВИЖНЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУЦИЙ МОСТОВ И ДРУГИХ СООРУЖЕНИЙ

Дата поступления: 25.01.2016

Решение о публикации: 14.06.2016

Цель: Разработать и описать новую конструкцию сейсмоизолирующего устройства, состоящего из упругодемпфирующего элемента, соединенного с изолированными частями сооружения фрикционно-подвижными соединениями (ФПС), предназначенного для снижения расчетных нагрузок на сооружение, а также для многоуровневого проектирования и управления повреждениями конструкции. **Методы:** Для анализа работы ФПС используются методы динамических расчетов сооружений, моделирование расчетных акселерограмм с использованием ЭВМ, а также натурные испытания при помощи сеймоплатформ. **Результаты:** Предложено конструктивное решение нового сейсмоизолирующего устройства, упругодемпфирующий элемент которого выполнен в виде столика, верхняя плита столика устанавливается на металлические стержни из высокопрочной стали, параллельно со столиком установлены гидравлические демпферы, а ФПС из пакетов стальных листов соединены высокопрочными болтами, пропущенными через овальные отверстия. Выявлено, что при относительно слабых землетрясениях описываемая конструкция работает в упругой стадии и ФПС заблокированы; при сильных землетрясениях, когда горизонтальная нагрузка превышает силу трения в ФПС, происходит проскальзывание элемента за счет формы отверстий, что обеспечивает взаимное смещение листов на величину зазора между болтом и краем овального отверстия и обеспечивает сохранность сооружения. **Практическая значимость:** Использование описанной системы сейсмозащиты позволяет снизить расчетные сейсмические нагрузки на сооружения в пределах 40–70% и спрогнозировать сценарии разрушения сооружения. Таким образом, снижается стоимость объекта строительства и повышается его надежность, что в свою очередь приводит к снижению экономических и социальных рисков при землетрясении.

Сейсмостойкость, сейсмоизоляция, фрикционно-подвижные болтовые соединения.

***Inna O. Kuznetsova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, i-kuznetsova@mail.ru; **Svetlana S. Vanicheva**, section head (Petersburg State Transport University); **Maksim V. Freze**, Cand. Sci. (Eng.); **Anzhelika A. Dolgaya**, Cand. Sci. (Eng.), design engineer (Transmost PLC); **Tagir M. Azayev**, Cand. Sci. (Eng.); **Khanzada R. Zaynulabidova**, Cand. Sci. (Eng.) (Dagestan State Technical University)
APPLICATION OF FRICTIONAL DYNAMIC BOLTED-TYPE CONNECTIONS TO ENSURE SEISMIC RESISTANCE OF ENGINEERING STRUCTURES OF BRIDGES AND OTHER OBJECTS

Objective: To develop and describe a new design of a seismic-isolation device consisting of elastic damping element connected to isolated parts of an object by frictional dynamic connections. It is intended for reduction of design load on an object, as well as multi-level designing and management of object damage. **Methods:** Structure dynamic calculation methods were used to analyse the operation of frictional dynamic connections, as were computer simulation of calculation accelerograms and full-

scale tests involving shake tables. **Results:** A design solution for a new seismic-isolation device is proposed. Its elastic damping element is shaped like a table, its top plate is placed on metallic bars made from high-resistance steel, hydraulic dampers are installed parallel to the table, and frictional dynamic connections made from piles of steel plates are linked by high-strength bolts put through oval openings. It was discovered that in cases of relatively minor earthquakes the construction described here is operating in elastic stage, and frictional dynamic connections get blocked. During strong earthquakes, when horizontal load exceeds friction force in frictional dynamic connections, slipping of an element occurs due to shape of openings which ensures mutual displacement of plates by gap width between the bolt and the edge of oval opening, which ensures the structure's preservation. **Practical importance:** Using the seismic resistance system described here allows for reduction of calculation seismic loads on structures by between 40 and 70 per cent, and to forecast scenarios of structure destruction. Thus the cost of construction object gets reduced, its reliability is increased, which cuts economic and social risks in case of an earthquake.

Seismic resistance, seismic isolation, frictional dynamic bolted-type connections.

В настоящее время в практике сейсмостойкого строительства сложился многоуровневый подход к обеспечению сейсмостойкости сооружения. В отечественной литературе такой подход получил название «проектирование сооружений с заданными параметрами предельных состояний» [7, 13], за рубежом его называют Performance Based Designing (PBD). При таком подходе отказываются от принципа равнопрочности сооружения и предусматривают наличие слабых мест, позволяющих управлять накоплением повреждений в конструкции, минимизируя дисперсию при прогнозе ущерба.

Во всех случаях в конструкции создаются узлы, в которых от экстремальных нагрузок могут возникать неупругие смещения элементов. Вследствие этих смещений нормальная эксплуатация сооружения, как правило, нарушается, однако исключается его обрушение. Эксплуатационные качества сооружения должны легко восстанавливаться после экстремальных воздействий. Для обеспечения указанного принципа проектирования и были предложены фрикционно-подвижные болтовые соединения (ФПС) [6]. Под ФПС понимаются соединения металлоконструкций высокопрочными болтами, отличающиеся тем, что отверстия под болты в соединяемых деталях выполнены овальными вдоль направления действия экстремальных нагрузок. При экс-

тремальных нагрузках происходит взаимная сдвигка соединяемых деталей на величину до 3–4 диаметров используемых высокопрочных болтов. Работа таких соединений имеет целый ряд особенностей и существенно влияет на поведение конструкции в целом. При этом во многих случаях можно снизить затраты на усиление сооружения, подверженного сейсмическим и другим интенсивным нагрузкам.

Описание фрикционно-подвижных соединений

ФПС были предложены в НИИ мостов ЛИИЖТа в 1980 г. и защищены авторскими свидетельствами [9–12 и др]. Простейшее стыковое и нахлесточное соединения приведены на рис. 1. При экстремальных нагрузках должны происходить взаимная подвижка соединяемых деталей вдоль овала и за счет этого уменьшаться пиковое значение усилий, передаваемое соединением.

При использовании обычных болтов их натяжение N не превосходит 80–100 кН, а разброс натяжения $\Delta N = 20–50$ кН, что не позволяет прогнозировать несущую способность такого соединения по трению. При использовании же высокопрочных болтов при том же ΔN натяжение $N = 200–400$ кН, что в

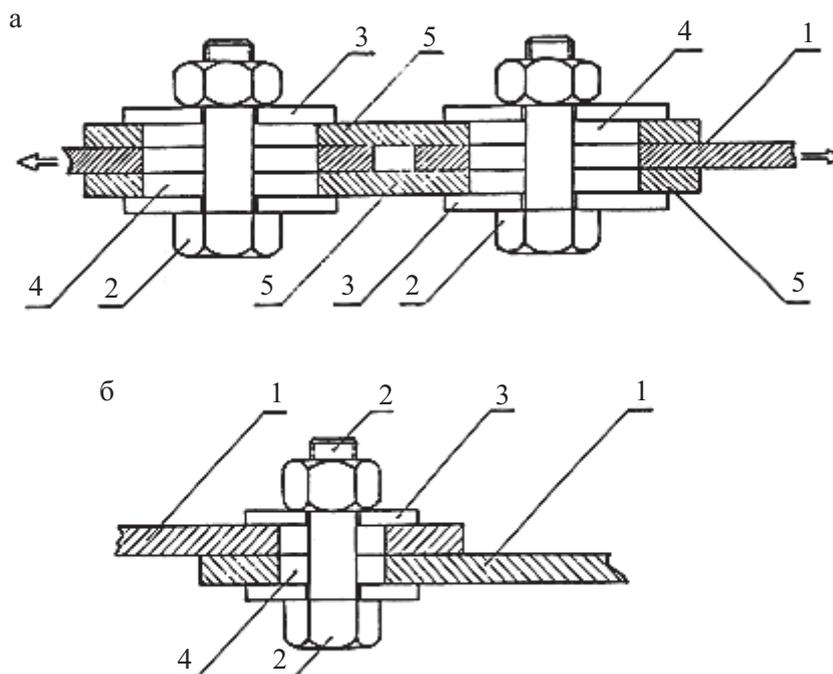


Рис. 1. Принципиальная схема фрикционно-подвижного соединения:
 а) встык; б) внахлест;
 1 – соединяемые листы; 2 – высокопрочные болты; 3 – шайба;
 4 – овалы отверстия; 5 – накладки

принципе может позволить задание и регулирование несущей способности соединения.

Однако проектирование и расчет таких соединений вызвал серьезные трудности. Первые испытания ФПС показали, что рассматриваемый класс соединений не обеспечивает в общем случае стабильной работы конструкции. В процессе подвижки соединение может заклинить, контактные поверхности соединяемых деталей оплавиться и т. п. [3–5]. Случались обрывы головки болта. Исследования 1985–1990 гг. позволили выявить способы обработки соединяемых листов, обеспечивающих стабильную работу ФПС. В частности, установлена недопустимость использования для ФПС пескоструйной обработки листов пакета, рекомендованы обжиг листов, нанесение на них специальной мастики или напыление мягких металлов. Исследования по рассматриваемому вопросу обобщены в [13].

В 1995 г. исследования по ФПС были представлены на 11-й всемирной конференции по сейсмостойкому строительству [14]. После

этого их начали применять за рубежом. Однако в России эти соединения не применялись в течение 20 лет после разработки теории ФПС в НИИ мостов [2].

Применение ФПС на мостах г. Сочи

Впервые ФПС использовали при строительстве железнодорожных мостов на олимпийских объектах в г. Сочи. В частности, было предложено новое опорное сейсмоизолирующее устройство (рис. 2). Устройство имеет три принципиальные особенности:

1) вертикальная и горизонтальная нагрузки передаются на разные элементы единого узла опирания, т. е. в системе опирания имеются независимые опорный и сейсмоизолирующий элементы. Опорный элемент выполнен в виде обычной подвижной опорной части, жесткой в вертикальном направлении. Это исключает вертикальные смещения пролетного строения под нагрузкой;

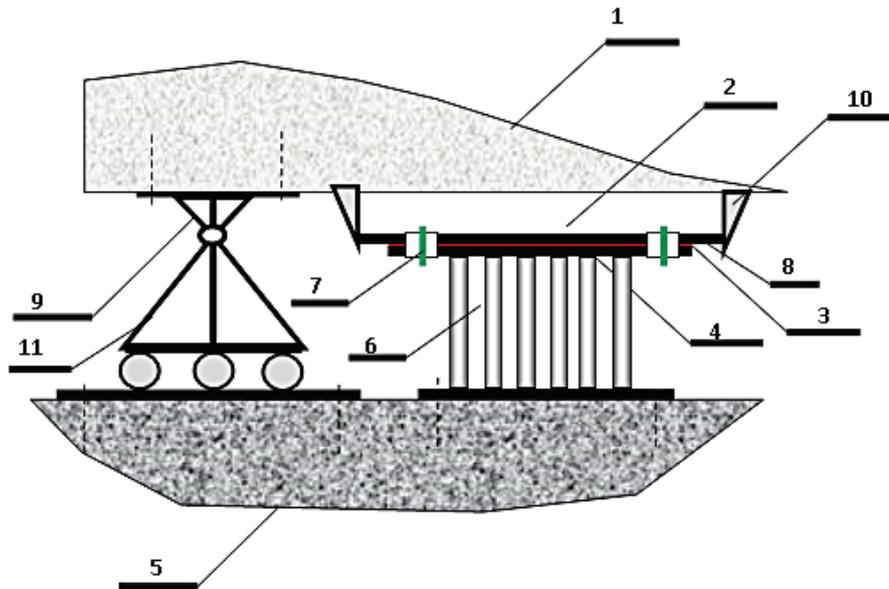


Рис. 2. Схема устройства сейсмоизоляции на железнодорожных мостах в г. Сочи:
 1 – пролетное строение; 2 – зазор между податливым элементом и пролетным строением;
 3 – антифрикционное покрытие; 4 – верхний лист податливого элемента; 5 – опора; 6 – податливый элемент; 7 – ФПС; 8 – дополнительный лист; 9 – шарнирный балансир; 10 – упоры;
 11 – подвижная опорная часть

2) сейсмоизолирующий элемент выполнен составным в виде упругого столика из стальных стержней (стержневого амортизатора) и пакета стальных листов, объединенных ФПС;

3) сила трения в ФПС не превосходит разрушающей нагрузки на опору и столик.

Для снижения сейсмических нагрузок на опоры и относительных смещений пролетных строений на опорах мостов дополнительно устанавливались демпферы. Для этого использованы гидравлические демпферы фирмы «Вибросейсм», детально описанные в [15].

Как видно из рис. 2, между пролетным строением 1 и опорой 5 параллельно с податливым сейсмоизолирующим элементом 6 устанавливается опорный элемент 11, представляющий собой обычную подвижную опорную часть с шарнирным балансиром 9. Верхний лист податливого элемента 4 с антифрикционным покрытием 3 соединен с дополнительным листом 8 с помощью ФПС 7. При этом листы 4 и 8 с антифрикционным покрытием 3 и ФПС 7 образуют верхний скользящий элемент. На пролетное строение

1 устанавливаются упоры 10, контактирующие с дополнительным листом 8 и имеющие свободу вертикальных перемещений относительно листа 4. При этом податливый элемент со скользящим элементом имеют высоту h меньше, чем высота подвижной опорной части H за счет устройства зазора 2. Это исключает передачу на податливый элемент вертикальной нагрузки от пролетного строения, которая полностью воспринимается подвижной опорной частью.

При эксплуатационных нагрузках (торможении подвижного состава, поперечных ударах транспортных средств), а также при действии проектного землетрясения (ПЗ) горизонтальные нагрузки передаются от пролетного строения 1 на опору 5 через упоры 10 и податливый элемент 6. При этом динамические нагрузки на опору снижаются за счет амортизирующего действия податливого элемента. При максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) происходит подвижка в ФПС, пиковые нагрузки на опору ограничиваются силой трения в ФПС и обеспечивается сохранность сооружения (пролетные строения

не сбрасываются с опор) [1]. Таким образом, расчетные нагрузки снижаются при действии как ПЗ, так и МРЗ.

Предлагаемая конструкция позволяет проектировать сооружения с заданными параметрами предельных состояний, а также сценарий накопления повреждений в сооружении при сейсмических воздействиях [8].

Расчетный анализ работы ФПС при землетрясении

Рис. 3 иллюстрирует работу устройства при МРЗ. На нем представлены расчетные зависимости от времени ускорений и смещений элементов моста при землетрясении.

В верхней части рис. 3 показана расчетная акселерограмма, имеющая ускорения около $2,2 \text{ м/с}^2$. По своим энергетическим характеристикам и пиковым ускорениям в диапазоне частот около 1 с акселерограмма описывает 9-балльное землетрясение. При этом смещение пролетного строения составило более 12 см, однако смещение верха опор оказалось менее 1 см. Интерес представляет диаграмма чередования состояний системы. При значении 1 на диаграмме ФПС закрыто и система работает упруго. При значении 0 на диаграмме ФПС открыто и пролетное строение скользит относительно опоры. В рассмотренном примере проскальзывание возникает практически сразу после начала воздействия, а максимальный сдвиг достигает 11 см. На рис. 3 выделе-

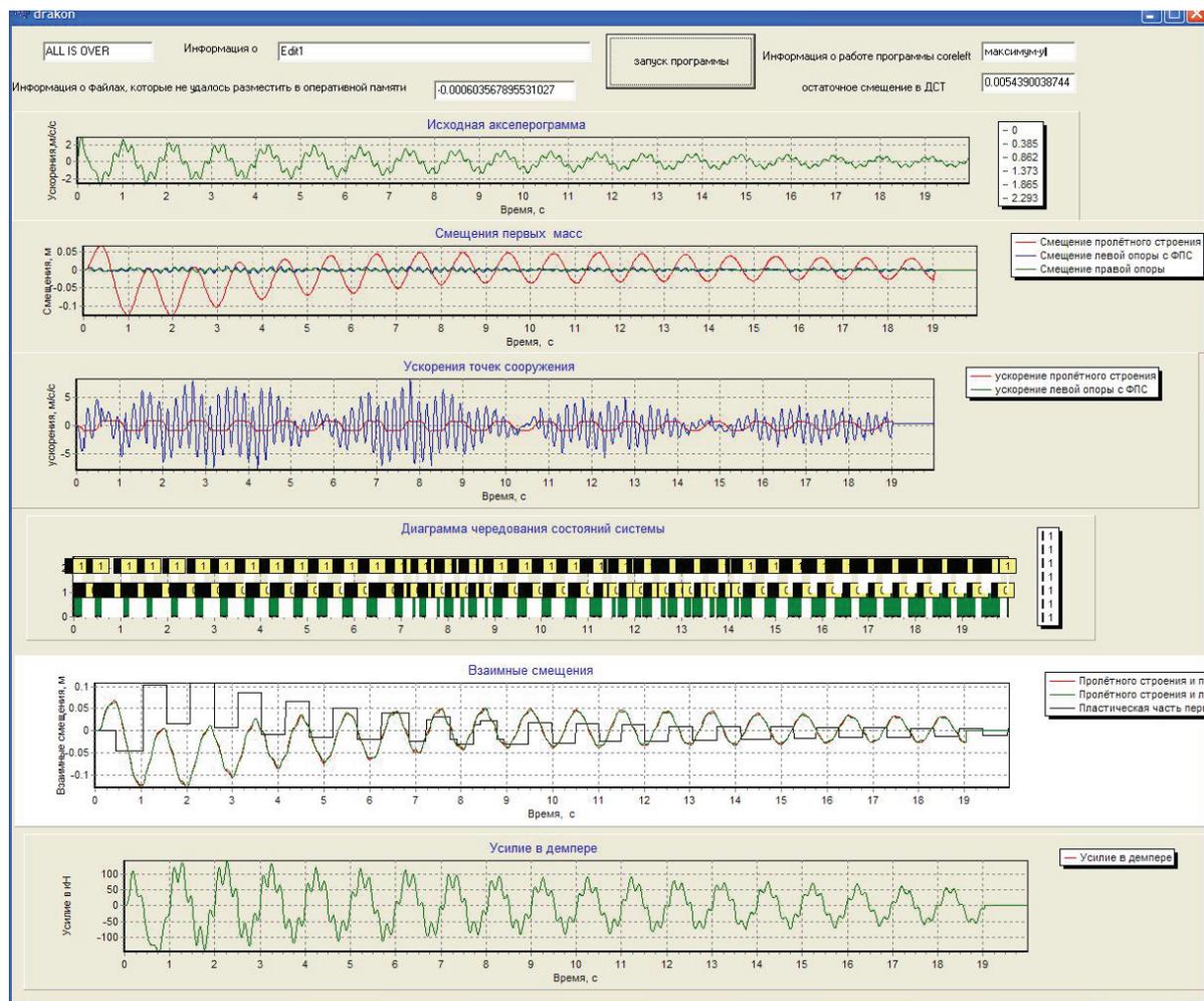


Рис. 3. Результаты расчета сейсмоизолированного моста на действие МРЗ

но полное (упругое и пластическое) смещение пролетного строения. Хорошо видно, что при МРЗ пластические смещения в ФПС преобладают над упругими смещениями за счет деформации столика.

В нижней части рис. 3 приведены усилия в демпфере. Пиковые значения усилий достигают 180 кН. Это составляет примерно 15% от сейсмической нагрузки.

Принятая концепция проектирования обеспечивает сохранность опор и отсутствие сброса пролетного строения при любых расчетных землетрясениях. Конструкция опорных устройств обеспечивает один вид повреждений – подвижки в ФПС, соединяющих опору с пролетным строением. Сценарий накопления повреждений (рост подвижки) представлен в таблице.

Заключение

В заключение отметим, что по предлагаемой методике и с использованием предлагаемых технических решений сейсмозащитных устройств в Сочи построено более 100 мостовых опор. Применение этих устройств позволяет на 40–70% снизить расчетную нагрузку на опоры и обеспечить прогнозируемые и легко поддающиеся ремонту повреждения мостов при редких разрушительных землетрясениях.

На рис. 4, 5 представлены мосты с фрагментами сейсмозащиты в г. Сочи. Предлагаемые и уже реализованные устройства обеспечивают сейсмозащиту моста как при проектных, так и при максимальных расчетных землетрясениях. При этом прогнозируется ха-

Пример сценария накопления повреждений для одной из эстакад железнодорожной линии Адлер – Сочи

Показатель	Значение			
	5–6	7	8	9
Сила землетрясения, балл	5–6	7	8	9
Ориентировочная повторяемость, год	20	200	500	1000
Ускорение, м/с ²	0,35	1,09	1,61	2,398
Подвижка, см	0,1	1,6	6,3	12,5
Число подвижек за время землетрясения	2	23	35	38

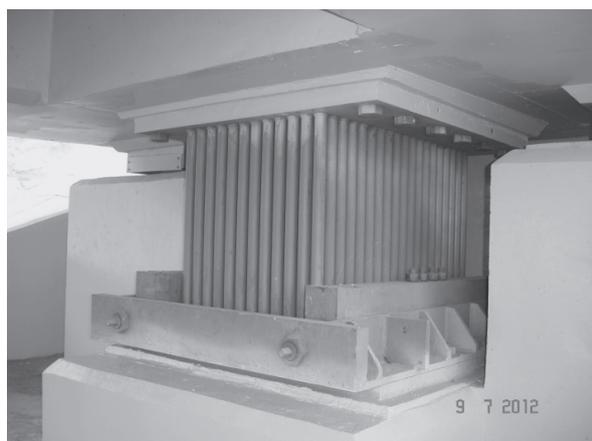


Рис. 4. Стержневой амортизатор с ФПС, установленный на железнодорожном мосту через р. Мзымта в районе в г. Сочи



Рис. 5. Стержневые амортизаторы с ФПС на одной из железнодорожных эстакад в г. Сочи

раक्टर накопления повреждений в конструкции и обеспечивается ее ремонтпригодность после разрушительных землетрясений. Это пока единственная в мире система сейсмозащиты, которая обеспечивает нормальную эксплуатацию моста, не приводя к расстройству пути при эксплуатационных нагрузках и проектных землетрясениях.

Таким образом, применение ФПС позволило реализовать новую систему сейсмозащиты железнодорожных мостов, которая обеспечивает снижение сейсмических нагрузок при ПЗ и МРЗ и нормальную эксплуатацию сооружения.

Библиографический список

1. Азаев Т.М. Оценка сейсмостойкости мостов по условию сброса пролетных строений с опор / Т.М. Азаев, И.О. Кузнецова, А.М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – Вып. 1. С. 38–42.

2. Белаш Т.А. Сейсмоизоляция. Современное состояние / Т.А. Белаш, В.С. Беляев, А.М. Уздин и др. // Избранные статьи профессора О.А. Савинова и ключевые доклады, представленные на IV Савиновские чтения. – СПб. : Ленинград. Промстройпроект, 2004. – С. 95–128.

3. Березанцева Е.В. Фрикционно-подвижные соединения на высокопрочных болтах / Е.В. Березанцева, Е.В. Сахарова, А.Ю. Симкин, А.М. Уздин // Междунар. коллоквиум : Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных конструкциях. Т. 1. – М., 1989. – С. 73–76.

4. Деркачев А.А. Исследование свойств стержневых конструкций с упруго-фрикционными соединениями на высокопрочных болтах / А.А. Деркачев, В.С. Давыдов, С.И. Клигерман // Сейсмостойкое строительство. – 1981. – Вып. 3. – С. 7–10.

5. Евдокимов В.В. Несущая способность сдвигоустойчивых соединений с увеличенными отверстиями под высокопрочные болты / В.В. Евдокимов, В.М. Бабушкин // Междунар. коллоквиум : Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных конструкциях. Т. 1. – М., 1989. – С. 77–80.

6. Елисеев О.Н. Элементы теории трения, расчет и технология применения фрикционно-подвижных соединений / О.Н. Елисеев, И.О. Кузнецова, А.А. Никитин и др. – СПб. : ВИТУ, 2001. – 75 с.

7. Килимник Л.Ш. О проектировании сейсмостойких зданий и сооружений с заданными параметрами предельных состояний / Л.Ш. Килимник // Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – № 2. – С. 40–44.

8. Кузнецова И.О. Сейсмоизоляция – способ проектирования сооружений с заданными параметрами предельных состояний и сценариев накопления повреждений / И.О. Кузнецова, Ван Хайбинь, А.М. Уздин, С.А. Шульман // Избранные статьи проф. О.А. Савинова и ключевые доклады, представленные на VI Савиновские чтения. – СПб., 2010. – С. 105–120.

9. Савельев В.Н., Уздин А.М., Хусид Р.Г. Болтовое соединение. А. с. СССР № 1168755, МКИ F 16 В 5/02, 35/04, 1983.

10. Савельев В.Н., Уздин А.М., Хусид Р.Г. Болтовое соединение плоских деталей встык. А. с. СССР № 1174616, МКИ F 16 В 5/02, 35/04, 1983.

11. Савельев В.Н. Особенности работы соединений на высокопрочных болтах на знакопеременные нагрузки типа сейсмических / В.Н. Савельев, А.Ю. Симкин // Сейсмостойкое строительство. – 1985. – Вып. 10. – С. 20–24.

12. Савельев В.Н., Уздин А.М., Хусид Р.Г., Кистерский С.В. Способ соединения листов в пакет. А. с. СССР № 1184981, МКИ F 16 В 5/02, 35/04, 1983.

13. Уздин А.М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учеб. пособие / А.М. Уздин, С.В. Елизаров, Т.А. Белаш. – М. : УМЦ ЖДТ, 2012. – 500 с.

14. Hashem A. M. The use of the friction-movable braces for designing the seismic proof structures with predetermined parameters of ultimate conditions / A. M. Hashem, A. M. Uzdin // 11-th World Conf. Earthquake Eng. Paper 51.

15. Kostarev V. V. Providing the earthquake stability and Increasing the reliability and resources of pipelines using viscous dampers / V. V. Kostarev, L. Yu. Pavlov, A. M. Schukin, A. M. Berkovsky // Proc. Workshop „Bridges seismic isolation and large-scale modeling“, St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. – St. Petersburg, 2010. – P. 59–70.

References

1. Azayev T. M., Kuznetsova I. O. & Uzdin A. M. *Seismostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy – Seismic-Resistant Construction. Structure Safety*, 2003, Is. 1, pp. 38-42.

2. Belash T. A., Belyayev V. S., Uzdin A. M., Yermoshin A. A. & Kuznetsova I. O. Seismoizolyatsiya. Sovremennoye sostoyaniye [Seismic Isolation. Modern Condition]. *Izbrannyye stati professora O. A. Savinova i klyuchevyye doklady, predstavlenyye na IV Savinovskiyechteniya [Selected Articles by Professor O. A. Savinov and Key Reports Presented at the 4th Savinov Readings]*. St. Petersburg, Leningradskiy Promstroyproyekt, 2004. Pp. 95-128.
3. Berezantseva Ye. V., Sakharova Ye. V., Simkin A. Yu. & Uzdin A. M. Friksionno-podvizhnyye soyedineniya na vysokoprochnykh boltakh [Frictional Dynamic Connections with High-Strength Bolts]. *Mezhdunarodnyy kollokvium: Boltovyye i spetsialnyye montazhnyye soyedineniya v stalnykh konstruksiyakh [International Colloquium: Bolt and Special On-Site Connections in Steelwork]*. Vol. 1. Moscow, 1989. Pp. 73-76.
4. Derkachev A. A., Davydov V. S. & Kligerman S. I. *Seismostoykoye stroitelstvo – Seismic-Resistant Construction*, 1981, Is. 3, pp. 7-10.
5. Yevdokimov V. V. & Babushkin V. M. Nesushchaya sposobnost sdvigoustoychivykh soyedineniy s uvelichennymi otverstiyami pod vysokoprochnyye bolty [Bearing Capacity of Shear-Resisting Connections with Increased Openings for High-Strength Bolts]. *Mezhdunarodnyy kollokvium: Boltovyye i spetsialnyye montazhnyye soyedineniya v stalnykh konstruksiyakh [International Colloquium: Bolt and Special On-Site Connections in Steelwork]*. Vol. 1. Moscow, 1989. Pp. 77-80.
6. Yeliseyev O. N., Kuznetsova I. O., Nikitin A. A., Pavlov V. Ye., Simkin A. Yu. & Uzdin A. M. Elementy teorii treniya, raschet i tekhnologiya primeneniya friksionno-podvizhnykh soyedineniy [Elements of Friction Theory, Calculation and Technology for Application of Frictional Dynamic Connections]. St. Petersburg, VITU, 2001. 75 p.
7. Kilimnik L. Sh. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenoy – Construction Mechanics and Structure Calculation*, 1975, no. 2, pp. 40-44.
8. Kuznetsova I. O., Van Khaybin, Uzdin A. M. & Shulman S. A. Seismoizolyatsiya – sposob proyektirovaniya sooruzheniy s zadannymi parametrami predelnykh sostoyaniy i stsenariyev nakopleniya povrezhdeniy [Seismic Isolation as a Method for Designing Structures with Set Parameters of Limit States and Damage Accumulation Scenarios]. *Izbrannyye stati professora O. A. Savinova i klyuchevyye doklady, predstavlenyye na VI Savinovskiyechteniya [Selected Articles by Professor O. A. Savinov and Key Reports Presented at the 6th Savinov Readings]*. St. Petersburg, 2010. Pp. 105-120.
9. Savelyev V. N., Uzdin A. M. & Khusid R. G. Boltovoye soyedineniye [Bolt Connection]. Invention Certificate A. S. SSSR N 1168755, MKI F 16 B 5/02, 35/04, 1983.
10. Savelyev V. N., Uzdin A. M. & Khusid R. G. Boltovoye soyedineniye ploskikh detaley vстыk [Butt-to-Butt Bolt Connection of Flat Parts]. Invention Certificate A. S. SSSR N 1174616, MKI F 16 B 5/02, 35/04, 1983.
11. Savelyev V. N. & Simkin A. Yu. *Seismostoykoye stroitelstvo – Seismic-Resistant Construction*, 1985, Is. 10, pp. 20-24.
12. Savelyev V. N., Uzdin A. M., Khusid R. G. & Kisterskiy S. V. Sposob soyedineniya listov v paket [Method for Connecting Plates into Piles]. Invention Certificate A. S. SSSR N 1184981, MKI F 16 B 5/02, 35/04, 1983.
13. Uzdin A. M., Yelizarov S. V. & Belash T. A. Seismostoykiye konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy : uchebnoye posobiye [Seismic-Resistant Designs for Transport Buildings and Structures : Course Guide]. Moscow, UMTs ZhDT, 2012. 500 p.
14. Hashem A. M. & Uzdin A. M. The use of the friction-movable braces for designing the seismic proof structures with predetermined parameters of ultimate conditions. *11th World Conf. Earthquake Eng.* Paper 51.
15. Kostarev V. V., Pavlov L. Yu., Schukin A. M. & Berkovsky A. M. Providing the earthquake stability and increasing the reliability and resources of pipelines using viscous dampers. *Proc. Workshop "Bridges seismic isolation and large-scale modeling"*, St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. St. Petersburg, 2010. Pp. 59-70.

*КУЗНЕЦОВА Инна Олеговна – канд. техн. наук, доцент, i-kuznetsova@mail.ru; ВАНИЧЕВА Светлана Сергеевна – начальник отдела (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ФРЕЗЕ Максим Владимирович – канд. техн. наук; ДОЛГАЯ Анжелика Александровна – канд. техн. наук, инженер-проектировщик (ОАО «Трансмост»); АЗАЕВ Тагир Магомедович – канд. техн. наук; ЗАЙНУЛАБИДОВА Ханзада Рауповна – канд. техн. наук (Дагестанский государственный технический университет).