

Влияние силы сжатия на характеристики вязкоупругого материала

Ю.В. Юркин¹, Н. Ронсе-Парра², Р.С. Рогожкин¹, Д.А. Варанкина¹

¹Вятский государственный университет, Киров

²Мадридский политехнический университет, Мадрид

Аннотация: В настоящее время одним из самых перспективных и экономически целесообразных методов сейсмоизоляции является использование систем пассивного рассеивания энергии. Исследования, проведенные в этой статье, ориентированы на использование нового гибридного устройства рассеивания энергии, который сочетает в себе параллельный слой недорогого вязкоупругого материала и металлического компонента. Обычно вязкоупругий материал в таких системах крепится к стальным амортизаторам при помощи клея. В данной статье изучено поведение вязкоупругого материала, когда он крепится к металлическому компоненту без использования клея, удерживаясь только силами трения и давлением. Установлено влияние силы сжатия на упругие и демпфирующие свойства вязкоупругого материала, устраиваемого в сейсмическом демпфере, и определена сила прижима, которая обеспечивает оптимальные функциональные свойства вязкоупругого материала.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмическая безопасность, демпфер, терморасширение, вязкоупругий материал, резиновая смесь, каучук, смола, полимер, вибрация, сейсмоизоляция.

Введение

Существуют традиционные и нетрадиционные способы обеспечения сейсмической безопасности зданий [1, 2]. Традиционный способ проектирования конструкций продуман таким образом, что основная конструкция с помощью своих балок и колонн выдерживает вертикальные нагрузки и, кроме того, способна рассеивать большую часть энергии, поступающей от землетрясения, за счет деформаций в пластических шарнирах, образующихся в элементах конструкции. Однако, такой подход может не предотвратить обрушение конструкции и привести к серьёзному повреждению. Землетрясения 1994 года в Нортридже (Калифорния) и 1995 года в Кобе (Япония) стали важной вехой в концепции дизайна, реализовавшегося до тех пор. Это привело к появлению нового подхода (нетрадиционного), так называемого проектирования, основанного на производительности (performance-based design, PBD), который направлен на контроль и минимизацию ущерба зданию и экономических потерь. Уже

доказано, что конструкции с системами рассеивания энергии способны очень эффективно решать задачи, поставленные PBD. Эти системы работают параллельно основной конструкции и состоят из специальных структурных элементов, называемых устройствами рассеивания энергии (energy dissipation devices, EDD), отвечающими за ограничение повреждения структурных и неструктурных элементов. EDD, обычно известные, как демпферы, отвечают за защиту основной конструкции, поглощая всю энергию, поступающую от сейсмического воздействия, и ограничивая потребность конструкции в рассеивании энергии за счет пластических деформаций. Повреждения в основном сосредоточены в EDD, которые специально сконструированы таким образом, чтобы их можно было легко проверить, отремонтировать или заменить. С момента своего первого применения в начале 1970-х годов [3] добавление EDD зарекомендовало себя как эффективная технология сейсмической защиты зданий.

Существует два типа EDD, один из которых зависит от перемещения, а другой – от скорости [4]. К первому типу относятся металлические и фрикционные EDD [5]. Их самыми большими преимуществами являются низкая цена и стабильное гистерезисное поведение, на которое не влияют температура или частота, кроме того, они отличаются высокой надежностью в долгосрочной перспективе и не требуют технического обслуживания. Но у них также есть некоторые недостатки, такие, как их низкая эффективность при небольших смещениях ниже их рабочего смещения. Эти небольшие смещения могут быть вызваны слабыми землетрясениями, ветром или сильными землетрясениями с эпицентрами, расположенными далеко от здания. Другим недостатком, который влияет на металлические EDD и все конструкционные стальные элементы в целом, является высокая циклическая усталость, которая способна серьезно повредить консольные стальные конструкции [6]. Эта проблема возникает из-за большого количества циклов

упругости из-за ветра или слабых землетрясений. Также могут возникнуть проблемы с усталостью при малом цикле, из-за накопления пластических деформаций, вызванных сильными землетрясениями. В литературе предлагается большое разнообразие металлических EDD, недавний обзор современного состояния можно найти в [7].

К демпферам, зависящим от скорости, относятся вязкие жидкости и вязкоупругие твердые EDD [8]. Они способны приводиться в действие при очень малых перемещениях, но не обладают такой же способностью к рассеиванию энергии, как металлические демпферы. Основные недостатки жидкостных EDD заключаются в том, что они имеют высокую стоимость и риск утечки жидкости, что может вызвать проблемы с долгосрочной надежностью. С другой стороны, вязкоупругие твердые EED дешевле и не требуют технического обслуживания, хотя в этом случае основное беспокойство по поводу их надежности зависит от расслоения и разрыва материала. Вязкоупругие демпферы использовались в течение длительного времени для уменьшения вибраций, вызванных ветром и землетрясениями в зданиях [9], получая успешные результаты с точки зрения демпфирования, введенного в систему, и, следовательно, ослабляя сейсмическую реакцию здания с точки зрения смещения. Несмотря на достигнутые хорошие результаты, вязкоупругие EDD в значительной степени зависят от температуры окружающей среды и частоты возбуждения [10-11]. Поэтому подход к проектированию, основанный на максимальной эффективности демпфера, потребует учета этих параметров.

Существует не так много исследований по EDD, которые объединяют элементы, зависящие от перемещения и скорости, для формирования гибридных систем рассеивания энергии. Почти все существующие исследования носят численный характер. Эти системы могут быть соединены последовательно или параллельно и полезны для усиления индивидуальных

преимуществ каждого материала, уменьшая их недостатки. Существуют исследования по комбинации вязкоупругих EDD и EDD, зависящих от смещения, с самоцентрирующей способностью [12], можно найти другое исследование с параллельной комбинацией металлических EDD с EDD вязкой жидкости [13] или исследования с различными гибридными конфигурациями, в которых используется металлическая деталь и вязкоупругая или вязкожидкостная часть, соединенную параллельно или последовательно [14]. Исследования, проведенные в этой статье, ориентированы на использование нового гибридного EDD, который сочетает в себе параллельный слой недорогого вязкоупругого материала, подверженного сдвиговым деформациям с поведением, зависящим от скорости, и другой металлический компонент, который работает при изгибных и сдвиговых деформациях с поведением, зависящим от перемещения. Этот новый гибридный EDD представляет собой эволюцию металлического демпфера с многофазным поведением, предложенного авторами в предыдущих исследованиях [15], в котором основным отличием является добавление слоев специально разработанного недорогого вязкоупругого материала, который обеспечивает жесткость и способность рассеивать энергию при частых землетрясениях. В этом случае вязкоупругая часть будет активирована слабыми землетрясениями или ветром, а под действием сильных землетрясений будет активирована металлическая часть. Когда металлическая часть активирована, вклад вязкоупругой части незначителен.

Существуют различные способы крепления этого типа вязкоупругих материалов на стальных амортизаторах, которые обычно приклеиваются с помощью клея. В этой статье будет изучено поведение вязкоупругого материала, когда он крепится к стальной заслонке без использования клея, только давлением, удерживаясь только силами трения. Следовательно,

задачами, которые необходимо выполнить в этом исследовании, являются:

1. Определить влияние силы сжатия вязкоупругого материала между стальными пластинами на предельную деформацию сдвига, при которой отсутствует проскальзывание вязкоупругого материала в сборке;
2. Определить влияние силы сжатия на упругие и демпфирующие свойства вязкоупругого материала;
3. Определить оптимальную силу сжатия, которая обеспечивает наилучшие функциональные свойства.

Методы и принципы исследования

Материалы. Объектом исследования был вулканизированный вязкоупругий материал, состоящий из следующих компонентов. В качестве полимерной основы был выбран бутилкаучук БК-1675Н ТУ 38-303103-93 (ПАО Сибур Холдинг, Россия). Для увеличения скорости вулканизации введён сополимер – хлорбутилкаучук марки ХБК-139 ТУ 2294-096-05766801-2000 (ПАО «НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ», Россия). В качестве пластификатора-мягчителя в производстве композиции использовали индустриальное масло И-40 ГОСТ 20799-88 (РуссНефть, Россия), в качестве наполнителя – комбинация мела МИКАРБ (Геоком, Россия) и технического углерода марки П-803 (АО Нижнекамсктехуглерод, РФ) для повышения прочности композиционного материала. В качестве адгезионной добавки и агента вулканизации была выбрана алкилфенолформальдегидная смола SP-1045 ("SI Group", Франция).

Методы исследования

Подготовка образца к испытаниям

Образец для испытаний состоял из двух одинаковых вязкоупругих параллелепипедов толщиной 4 мм, шириной 25 мм и длиной 40 мм, которые

помещали между металлических пластин. Образец представлял собой симметричный «сэндвич», схема которого показана на рис. 1, процесс проведения испытания представлен на рис. 2.

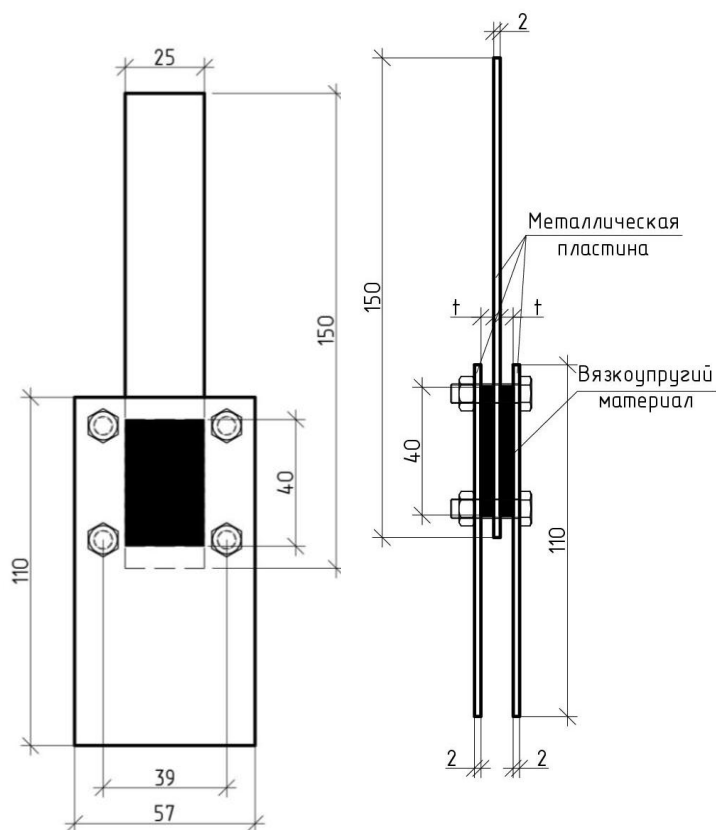


Рис. 1. – Схема образца для испытаний

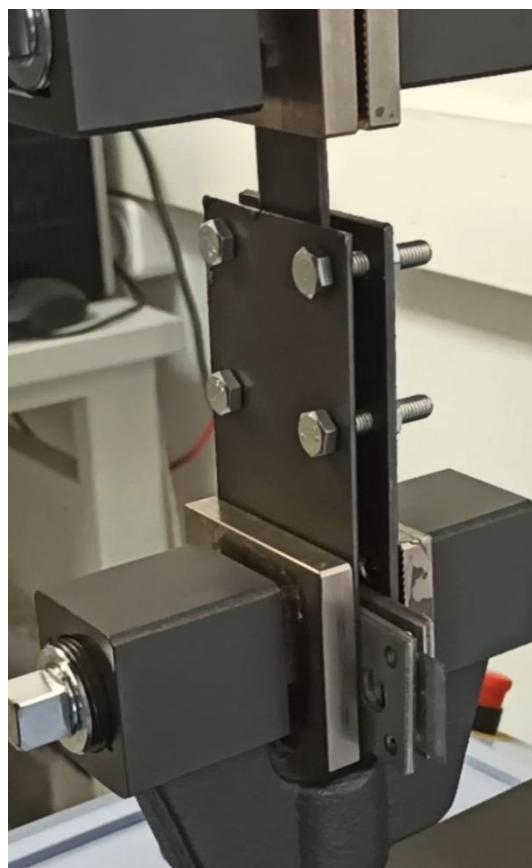


Рис. 2. – Испытание образца

Путем закручивания болтов в образцах создавалось контролируемое сжатие, в результате чего возникали силы трения, удерживающие вязкоупругий материал между пластинами. Контроль сжатия осуществлялся путем достижения вязкоупругим материалом фиксированных значений t (см. рис.1).

Проведение статических испытаний

Образец устанавливали в разрывную машину Autograph AG-X, Shimadzu и растягивали при комнатной температуре и скорости движения активного захвата 120 мм/мин до разрушения образца или проскальзывания

вязкоупругого материала между металлических пластин. При этом регистрировалось максимальное относительное удлинение и максимальное усилие F_{\max} .

Значение адгезии в МПа получали путем деления максимального усилия на общую площадь соединения вязкоупругого материала с жесткой пластиной по формуле:

$$\text{Адгезия} = F_{\max}/2A, \quad (1)$$

где F_{\max} – максимальное усилие, Н;

A – площадь одного вязкоупругого параллелепипеда равно 1000 мм^2 .

Проведение циклических испытаний

Образец устанавливали в разрывную машину Autograph AG–X Shimadzu, проводили пять последовательных циклов приложения и снятия нагрузки от 0 до 100 % деформации сдвига образца при комнатной температуре и скорости движения активного захвата 120 мм/мин.

Эквивалентный модуль сдвига в МПа при 100 % деформации определяли по формуле:

$$G_{100}=F_{100}/A, \quad (2)$$

где F_{100} – усилие при 100 % деформации сдвига, Н,

A – площадь одного вязкоупругого параллелепипеда, равная 1000 мм^2 .

Относительный гистерезис определяли по методике, описанной в ГОСТ 252, как отношение рассеянной энергии к энергии деформации пятого цикла.

Результаты и их обсуждение

Испытания проводились при трёх различных силах сжатия вязкоупругого материала между металлических пластин. При этом, толщина материала уменьшалась на 7,5 – 25 % от первоначальной, составляющей 4 мм. Образцы с различной силой сжатия представлены в таблице №1.

В результате статических испытаний образцов установлено, что у всех трех образцов вязкоупругий материал удерживался между металлическими пластинами силами трения до определенных значений усилий, после чего начиналось проскальзывание вязкоупругого материала между пластин. Визуальный осмотр вязкоупругого материала всех трех образцов после испытаний не выявил у них каких-либо механических повреждений. Это говорит о том, что напряжения, возникающие в вязкоупругом материале, не достигают предела прочности.

Таблица №1

Образцы с различной силой сжатия

Номер образца	Сжатие материала, %	Толщина образца t , мм
1	7,5	3,7
2	16,25	3,35
3	25	3

Зависимости изменения значений адгезии и максимальной относительной деформации от силы сжатия вязкоупругого материала между стальными пластинами представлены на рис. 2 и 3. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер: до силы, вызывающей 16,25 % сжатие вязкоупругого материала, значение адгезии и максимальная деформация сдвига быстро растут, но после этот рост заметно замедляется. При этом при 16,25 % предварительном сжатии вязкоупругого материала, предельная относительная деформация сдвига составит 240 % при значении адгезии 1,8 МПа.

Учитывая, что вязкоупругий материал предназначен для работы в гибридном демпфере, в котором до 200 % деформации сдвига работает вязкоупругий слой, а при большей деформации в работу включается металлический компонент, можно заключить, что сил трения для удержания

вязкоупругого материала в демпфере без использования дополнительных адгезионных систем более чем достаточно.

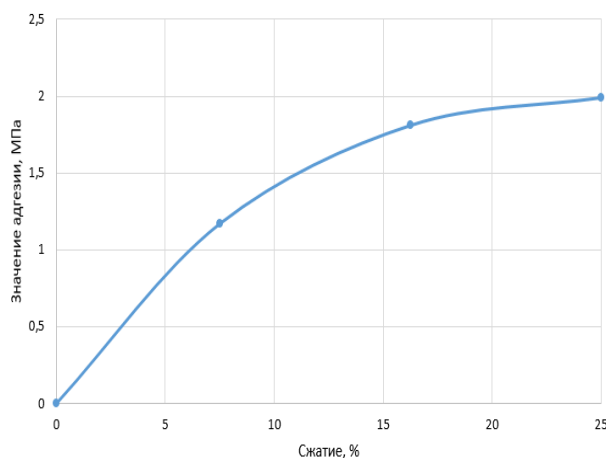


Рис. 2. – Значение адгезии от силы сжатия

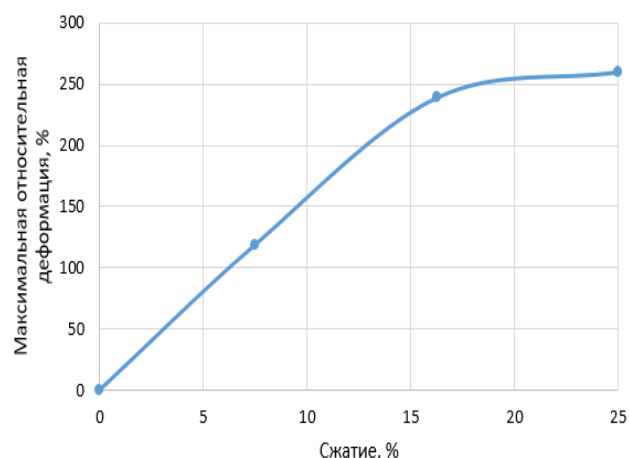


Рис. 3. – Максимальная относительная деформация от силы сжатия

Влияние силы сжатия на демпфирующие свойства вязкоупругого материала и эквивалентный модуль сдвига представлены на рис. 4 и 5.

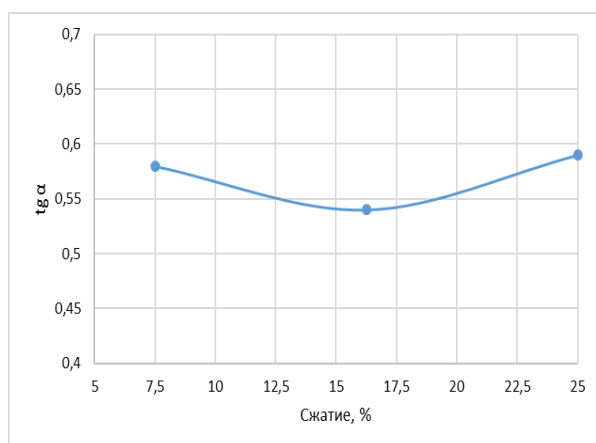


Рис. 4. – Зависимость тангенса угла механических потерь от силы сжатия

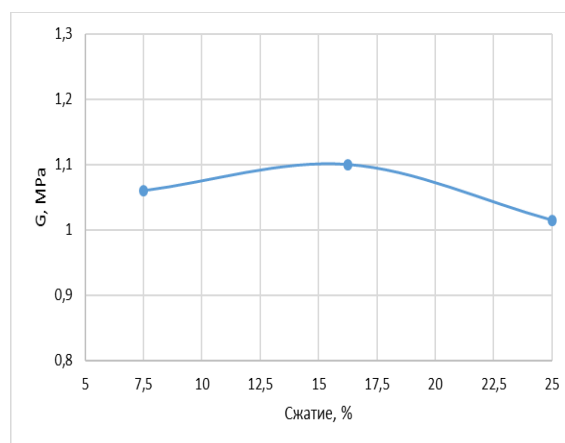


Рис. 5. – Зависимость эквивалентного модуля сдвига от силы сжатия

По графикам видно, что как модуль сдвига, так и относительный гистерезис практически не изменяются от значения предварительного сжатия

вязкоупругого материала (в пределах $\pm 5\%$). При этом модуль сдвига имеет значения $1,05 \pm 0,05$ МПа, а относительный гистерезис – $0,56 \pm 0,02$. Данные значения характеристик вязкоупругого материала говорят о том, что работая в составе гибридного демпфера он не только эффективно будет рассеивать энергию колебаний, но и за счет своей жёсткости способен брать на себя усилия, возникающие в демпфере до включения в работу металлического компонента.

Оценивая оптимальное значение предварительного сжатия вязкоупругого материала, следует руководствоваться двумя ограничениями. С одной стороны, сжатие должно обеспечить необходимый уровень сцепления вязкоупругого слоя с металлическими пластинами, чтобы деформация сдвига была не менее 240% (200% с коэффициентом запаса $1,2$), что соответствует $16,25\%$ по рис.2. С другой стороны, увеличение значения предварительного сжатия вязкоупругого материала ведет к увеличению его стоимости. Например, если в реальном демпфере зазор между металлическими пластинами для вязкоупругого материала составляет 15 мм, то изначальные размеры вязкоупругого материала должны быть 18 мм. При помещении такого материала в демпфер, он получит $16,66\%$ процентную деформацию, что, согласно рис. 2, обеспечит 240% максимальную деформацию сдвига при работе демпфера. Очевидно, что, увеличивая степень предварительного сжатия вязкоупругого материала, изначальные размеры материала будут расти, что приводит к увеличению его цены. Учитывая это, и тот факт, что значение адгезии и деформации сдвига свыше $16,25\%$ увеличиваются незначительно, данное значение предварительного сжатия вязкоупругого материала можно считать оптимальным.

Заключение

1. Сил трения для удержания вязкоупругого материала в демпфере без использования дополнительных адгезионных систем более чем достаточно.
2. Увеличение степени предварительного сжатия вязкоупругого материала для образования сил трения приводит к экспоненциальному росту значения адгезии и максимальной деформации сдвига, при этом практически не оказывая влияния на модуль сдвига и относительный гистерезис.
3. Оптимальное значение предварительного сжатия вязкоупругого материала составляет 16,25 %, при котором достигается максимальная относительная деформация 240 %, значение адгезии 1,8 МПа, эквивалентный модуль сдвига $1,05 \pm 0,05$ МПа и относительный гистерезис – $0,56 \pm 0,02$.

Благодарности

Проект реализуется при поддержке Фонда содействия институтов гражданского общества ПФО.

Литература

1. Вискребенцева М.А. Методы сейсмогашения и сейсмоизоляции с применением специальных устройств // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5656.
2. Смирнов И.И. Конструктивные особенности энергопоглотителей для сейсмозащиты сооружений // Инженерный вестник Дона, 2017, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4358.
3. Skinner R.I., Kelly, J.M., Heine, A.J. Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures // Earthq. Eng. Struct. Dyn., 1974, 3, pp. 287–296.
4. Symans M.D., Charney F., Whittaker M., Constantinou M.C., Kircher M., Johnson M.W., McNamara R.J. Energy dissipation systems for seismic

- applications: current practice and recent developments // Journal of Structural Engineering ASCE, 2008, №134(1), pp. 3-21.
5. Soong T.T., Spencer B.F., Jr. Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice // Eng. Struct, 2002, № 24, pp. 243–259.
 6. Fang Z., Li A., Li W., Shen S. Wind-induced fatigue analysis of high-rise steel structures using equivalent structural stress method // Appl. Sci., 2017, №7(71), pp. 1-18.
 7. Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Ghadim H.B., Hanif M.U. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation // Arch Computat Methods Eng, 2020, № 27, pp. 455–478.
 8. Chang K.C., Soong T.T., Lai M.L., Nielsen E.J. Viscoelastic dampers as energy dissipation devices for seismic applications // Earthquake Spectra, 1993, №9(3), pp. 371-387.
 9. Mahmoodi P., Robertson L.E., Yontar M., Moy C., Feld L. Performance of viscoelastic dampers in world trade center towers // In Dynamics of structures, 1987, pp. 632-644.
 10. Soda S., Takahashi Y. Quantification of frequency-dependent property of viscoelastic damper by random loading method // Journal of Structural and Construction Engineering, 1997, № 498, pp. 43-49.
 11. Kasai K. Constitutive rule for viscoelastic materials considering temperature, frequency, and strain sensitivities // Journal of Structural and Construction Engineering, 2001, № 543, pp. 77-86.
 12. Karavasilis T.L., Blakeborough T., Williams M.S. Development of nonlinear analytical model and seismic analyses of a steel frame with self-centering devices and viscoelastic dampers // Computers and Structures, 2011 № 89, pp. 1232-1240.
-

13. Vargas R., Bruneau M. Effect of Supplemental Viscous Damping on the Seismic Response of Structural Systems with Metallic Dampers // Journal Struct. Eng., 2007, № 133(10), pp. 1434-1444.
14. Marshall J.D., Charney F.A. Seismic response of steel frame structures with hybrid passive control systems // Earth. Eng. and Struct. Dynamics, 2012, №41, pp. 715-733.
15. Benavent-Climent A., Escolano-Margarit D., Arcos-Espada J., Ponce-Parra H. New metallic damper with multiphase behavior for seismic protection of structures // Metals, 2021 № 11(183), pp. 1-29.

References

1. Vyskrebenceva M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5656.
2. Smirnov I.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4358.
3. Skinner R.I., Kelly, J.M., Heine, A.J. Earthq. Eng. Struct. Dyn., 1974, 3, pp. 287–296.
4. Symans M.D., Charney F., Whittaker M., Constantinou M.C., Kircher M., Johnson M.W., McNamara R.J. Journal of Structural Engineering ASCE, 2008, №134(1), pp. 3-21.
5. Soong T.T., Spencer B.F., Jr. Eng. Struct, 2002, № 24, pp. 243–259.
6. Fang Z., Li A., Li W., Shen S. Appl. Sci., 2017, №7(71), pp. 1-18.
7. Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Ghadim H.B., Hanif M.U. Arch Computat Methods Eng, 2020, № 27, pp. 455–478.
8. Chang K.C., Soong T.T., Lai M.L., Nielsen E.J. Earthquake Spectra, 1993, №9(3), pp. 371-387.



9. Mahmoodi P., Robertson L.E., Yontar M., Moy C., Feld L. In Dynamics of structures, 1987, pp. 632-644.
10. Soda S., Takahashi Y. Journal of Structural and Construction Engineering, 1997, № 498, pp. 43-49.
11. Kasai K. Journal of Structural and Construction Engineering, 2001, № 543, pp. 77-86.
12. Karavasilis T.L., Blakeborough T., Williams M.S. Computers and Structures, 2011 № 89, pp. 1232-1240.
13. Vargas R., Bruneau M. Journal Struct. Eng., 2007, № 133(10), pp. 1434-1444.
14. Marshall J.D., Charney F.A. Earth. Eng. and Struct. Dynamics, 2012, №41, pp. 715-733.
15. Benavent-Climent A., Escolano-Margarit D., Arcos-Espada J., Ponce-Parra H. Metals, 2021 № 11(183), pp. 1-29.