

УДК 69.07

© Т. А. Белаши, д-р техн. наук, профессор
(АО «НИИЦ» Строительство»,
Москва, Россия)

E-mail: belashta@mail.ru

© А. А. Чудаков, аспирант
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: chudakov@agiogk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-3-32-38

© Т. А. Belash, Dr. Sci. Tech, Professor
(JSC «Scientific Research Center «Construction»,
Moscow, Russia)

E-mail: belashta@mail.ru

© A. A. Chudakov, post-graduate student
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: chudakov@agiogk.ru

ДИНАМИЧЕСКИЙ ГАСИТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ КАК ЭЛЕМЕНТ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ КРЫШ ЗДАНИЙ

DYNAMIC VIBRATION DAMPER AS AN ELEMENT OF COMPREHENSIVE PROTECTION OF BUILDING ROOFS

Крыша здания чаще всего подвергается влиянию комплекса воздействий различного характера, таких как ураганные ветры, удары беспилотных летательных аппаратов. Также происходит увеличение сейсмичности территорий, которые раньше были достаточно спокойны. Возможность возникновения ситуации с последовательными воздействиями одного неблагоприятного фактора за другим вызывает необходимость создания комплексной защиты крыши здания. Для этой цели предлагается использовать динамический гаситель колебаний в виде гибкого верхнего этажа. Проведен анализ возможных вариантов конструктивных решений данной конструкции и возможности ее применения для других функций защиты.

Ключевые слова: гибкий верхний этаж, землетрясение, комплексная защита, ветер.

Building roof is most often exposed to a variety of impacts, such as hurricane-force winds and collisions with unmanned aerial vehicles. In addition, areas that were previously relatively calm are now experiencing increased seismic activity. The possibility of a situation with sequential impacts of unfavorable factors causes the need to create comprehensive protection of the building roof. For this purpose, it is proposed to use a dynamic vibration damper in the form of a 'flexible top floor'. There has been carried out an analysis of possible design options for this structure and the possibility of its application for other protective functions.

Keywords: flexible upper floor, earthquake, comprehensive protection, wind.

Введение

В последнее время все чаще происходят экстремальные воздействия на строительные конструкции, причина которых связана с изменением климата на планете и влиянием других, техногенных факторов. Это проявляется в частой смене температуры, возникновении сильных ветровых потоков, появлении в последнее время техногенных

воздействий в виде беспилотных летательных аппаратов и т. п. Причем на этом фоне могут наблюдаться куда более сильные проявления природной стихии, такие как землетрясения, возникающие уже в тех районах, которые раньше считались относительно спокойными. Все эти воздействия передаются на строительные конструкции зданий и сооружений и могут являться причиной

их серьезных повреждений и разрушений, нанося огромный ущерб. На рис. 1 приведены некоторые примеры обрушений конструкций, вызванных экстремальными воздействиями.

В связи с этим возникает вопрос, какие мероприятия следует предусмотреть для снижения ущерба от этих чрезвычайных ситуаций. Не нужно забывать, что одно воздействие может следовать за другим, а конструкции, которые уже подверглись разрушительному влиянию предыдущего воздействия, могут быть еще не восстановлены. Возникает ситуация, когда необходима защита, которая носила бы комплексный характер, снижаю-

щий разрушительный эффект как от одного, так и от другого воздействия. Создать такую защиту для всего здания в целом представляется сложной инженерной задачей, поэтому рассматривается одна из наиболее уязвимых частей здания — это его крыша, которая чаще всего подвергается влиянию комплекса воздействий различного характера.

Результаты и обсуждение

Известен широкий спектр многообразных конструктивных мероприятий по снижению негативных факторов от воздействий при землетрясениях (СП 14.13330.2018¹), ветро-

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Минстрой России, 2018. 122 с.

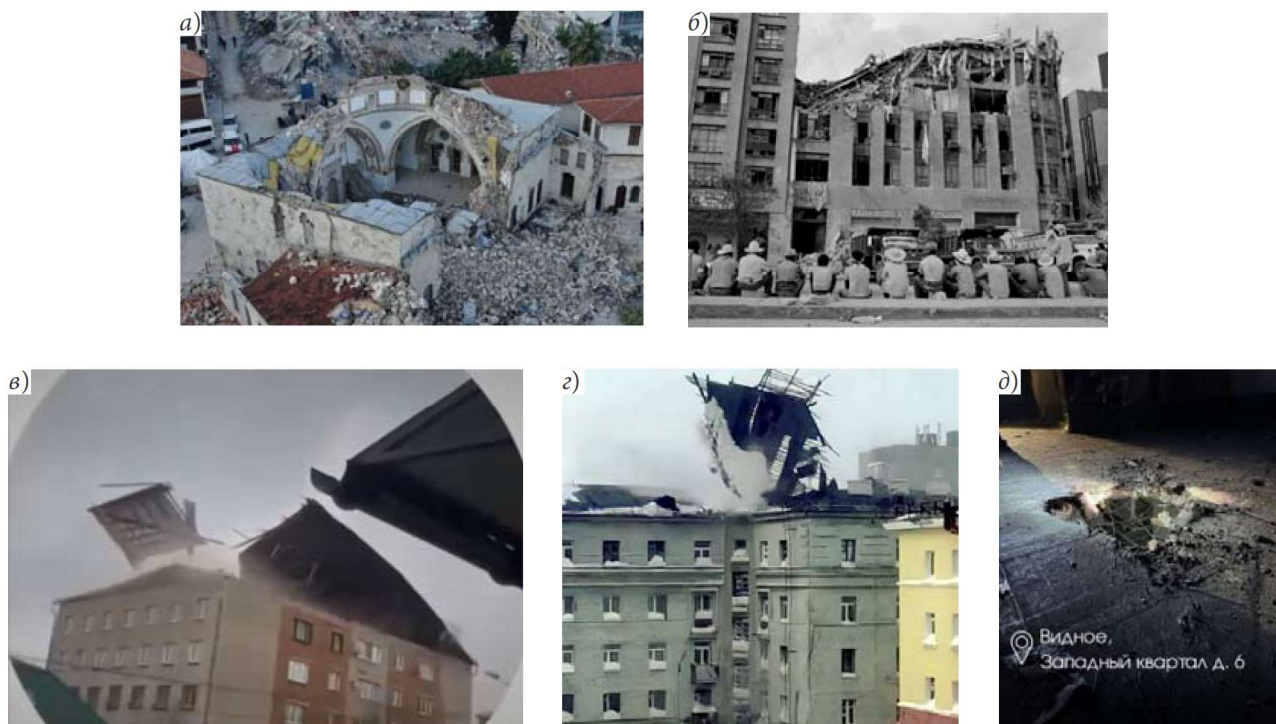


Рис. 1. Повреждения крыш здания от воздействий природного и техногенного характера: а — разрушения здания мечети Хабиб-и-Наджар в Турции в 2023 г.¹; б — разрушения здания в г. Мехико после землетрясения 1985 г.²; в — срыв крыши с дома в результате воздействия ураганного ветра в Красноярском крае³; г — срыв крыши с дома в результате воздействия ураганного ветра, г. Норильск⁴; д — повреждения крыши здания от попадания БПЛА, г. Видное⁵

¹ Землетрясение разрушило самую древнюю мечеть в Турции. URL: <https://life.ru/p/1558248>

² From the Archives: 1985: Mexico City in Chaos as Buildings Fall; Death Toll Heavy. URL: <https://www.latimes.com/world/la-fg-mexico-1985-earthquake-19850919-story.html>

³ В Красноярском крае бушует мощный ураган. URL: https://www.1tv.ru/news/2025-04-05/506165-v-krasnoyarskom_krae_bushuet_moschnyy_uragan?ysclid=m96250mxxi531004290

⁴ Ураган сорвал крышу российской многоэтажки и попал на видео. URL: <https://lenta.ru/news/2023/03/24/yragan/>

⁵ 20 пострадавших, пожар и разрушения. URL: <https://moskvichmag.ru/gorod/20-postradavshih-pozhar-i-razrusheniya-chto-izvestno-о-krupneyshej-atake-bespilotnikov-na-moskvu/>

вых (НП-064–17²), температурных нагрузках и даже при ударах беспилотных летательных аппаратов (СП 542.1325800.2024³), представленный в различной литературе (учебниках, рекомендациях МЧС⁴) [1]. Анализ этих мероприятий позволяет выявить конструкции, которые могли бы одновременно служить комплексной защитой крыши здания.

Среди них особое место занимает конструкция динамического гасителя колебаний в виде верхнего «гибкого этажа», которая нашла достаточно широкое применение в повышении сейсмостойкости зданий при землетрясениях. Особенностью этой конструкции является наличие над крышей здания дополнительной массы, выполненной различным образом, которая с помощью элементов упругой связи присоединяется непосредственно к зданию. Энергия колеблющейся конструкции здания во время землетрясения перераспределяется от защищаемой конструкции к гасителю, уменьшая уровень колебаний при сейсмических воздействиях. Масса гасителя представляет собой твердое тело, выполненное, например, в виде дополнительной конструкции верхнего этажа. В качестве упругих элементов могут быть использованы гибкие стойки, упругие стержни, резинометаллические элементы. В конструкцию динамического гасителя могут входить демпферные устройства различного рода. Эффективность рассматриваемой системы сейсмозащиты была исследована в работах известных ученых и специалистов в области моделирования динамических гасителей колебаний [2–12].

Возможность устройства динамического гасителя в виде надстраиваемого этажа созда-

ет условия, позволяющие закрыть пространство крыши здания и тем самым выполнить функцию защиты здания не только при сейсмических воздействиях, но и при возникновении сильных ураганных ветровых потоков, а также возможных отложениях снега, изменениях наружных температур и т. п. В связи с этим возникает необходимость, во-первых, проверки воздействия этих факторов на сохранение параметров динамического гасителя колебаний и, во-вторых, поиска оптимальных форм самого гасителя колебаний, который одновременно предлагается использовать для ветрозащиты. Защита здания с помощью динамического гасителя от пульсации скоростного напора ветра рассматривалась в работах Б. Г. Коренева и Л. М. Резникова [13], однако эти исследования были направлены только на восприятие ветровых потоков и не затрагивали особенности сейсмостойкого строительства.

В настоящей статье рассмотрены конкретные примеры исполнения динамического гасителя в зданиях, в которых в качестве гасящей массы используются части самого объекта, а также проанализированы работы, посвященные исследованию рассматриваемого вопроса.

А. И. Цейтлиным было впервые предложено решение многоэтажного сейсмостойкого здания с гибким верхним этажом (рис. 2) [14].

В 1980-х гг. в бывшем СССР были разработаны проектные решения зданий с гибким верхним этажом в двух вариантах: нежилым (проветриваемым) и жилым. Основной проблемой такого решения явилось обеспечение больших взаимных перемещений между верхом здания и дополнительным этажом. Впервые проект таких зданий был реализован армянскими специалистами в г. Кировакане (рис. 3, а, б). Исследования расчетов таких зданий, а также обоснования этой системы защиты были подробно изложены в работах Э. Е. Хачияна, М. Г. Мелкумяна и других

² НП-064–17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии». М.: Ростехнадзор, 2017. 65 с.

³ СП 542.1325800.2024. Защитные ограждающие конструкции от беспилотных летательных аппаратов Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2024. 30 с.

⁴ Рекомендации по инженерной защите объектов МЧС России от беспилотных воздушных средств нападения. М.: МЧС России, 2024. 56 с.

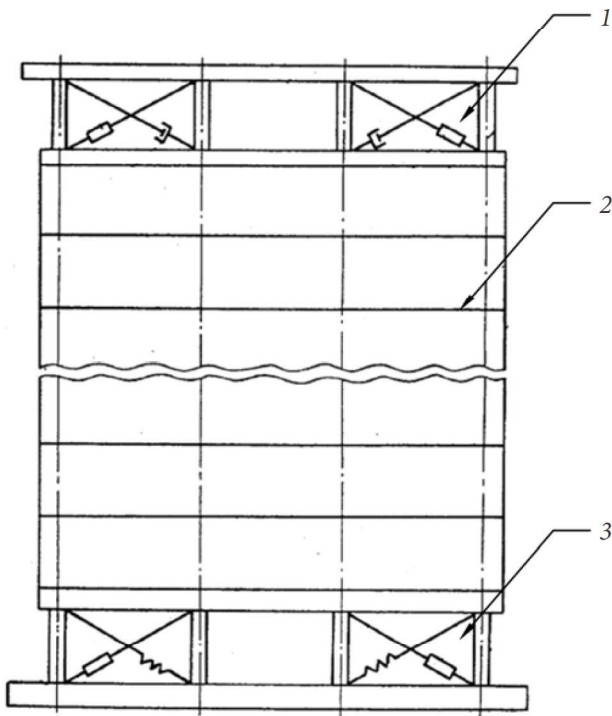


Рис. 2. Патент на многоэтажное сейсмостойкое здание [14]:
1 — гибкий верхний этаж, гасящий колебания;
2 — пространственные жесткие этажи; 3 — гибкий первый этаж, обеспечивающий виброизоляционный эффект

ученых (рис. 3, в, г) [10, 12, 15]. В настоящее время идея динамического гасителя колебаний получила развитие и распространение на территории Армении.

В другой работе [16] для уменьшения колебаний здания предложена система изоляции кровли, представляющая собой динамический гаситель колебаний, в котором в качестве гасящей массы рассматривается масса крыши здания (рис. 4, а). Система защиты включает в себя вставку резиновых слоистых опор между крышей здания и колоннами, а также дополнительных энергопоглотителей вязкого трения, превращающих кровлю в гаситель колебаний. Похожий вариант реализации динамического гасителя колебаний предложил Д. Е. Бондарев в своей работе [12] (рис. 4, б). Масса гасителя, образованная из массы крыши здания и надстроенного технического этажа, располагается на поясе, образованном изоляторами и демпферами.

Оценка области применения динамических гасителей в районах сейсмических воздействий с различными спектральными характеристиками была выполнена в работах В. С. Полякова [11]. Автор рекомендовал применять гасители в районах типа Газли (город в Узбекистане), где возможны землетрясения высокочастотного характера, — для сооружений с периодом собственных колебаний менее 1 с, а для районов, где возможны низкочастотные землетрясения, — для сооружений с периодом собственных колебаний более 1 с.

Гашение колебаний с использованием части конструкции здания в качестве гасителя рассмотрено в работе Ли Сяосуна [17]. Автор пришел к выводу, что динамический гаситель колебаний с верхним расположением при его большой относительной массе

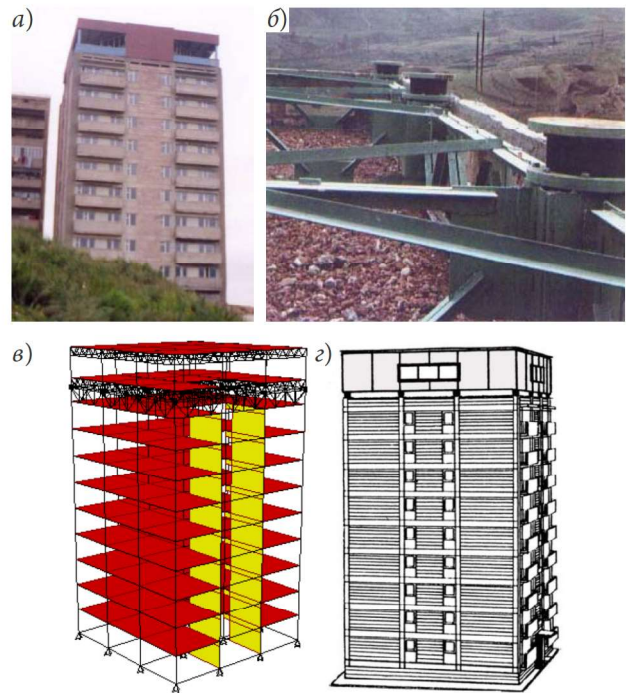


Рис. 3. Применение верхнего гибкого этажа в качестве динамического гасителя колебаний [15]: а — одно из существующих зданий с реализацией динамического гасителя колебаний в Армении; б — конструкция изолирующего пояса под надстраиваемый этаж; в — расчетная модель девятиэтажного здания с гибким верхним этажом; г — графическое изображение здания с гибким верхним этажом

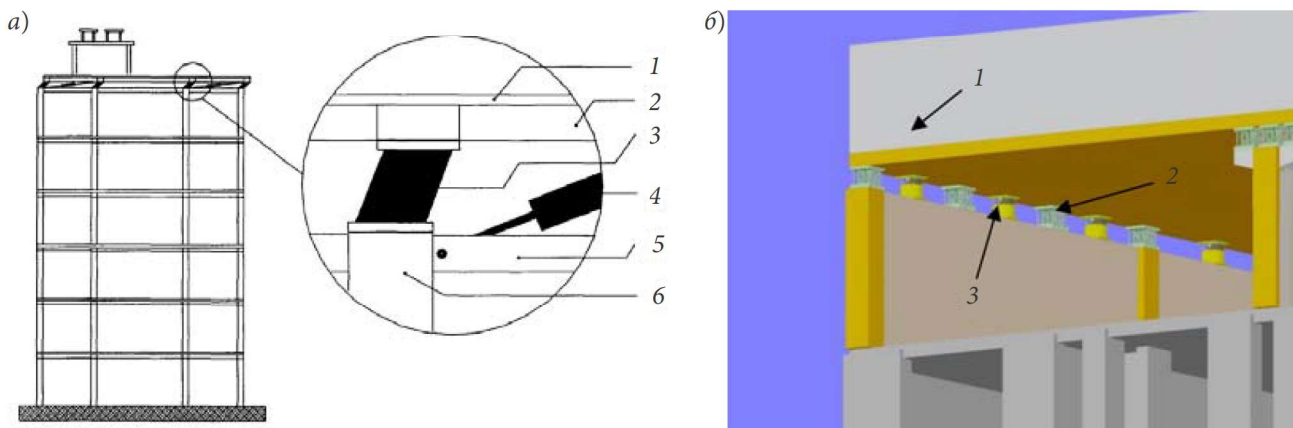


Рис. 4. Варианты реализации динамического гасителя колебаний: а — конструкция здания с динамическим гасителем колебаний в виде изолированной кровли (1 — плита покрытия; 2 — балка крыши; 3 — резиновая опора; 4 — энергопоглотитель вязкого трения; 5 — вспомогательная балка; 6 — колонна) [16]; б — конструкция динамического гасителя колебаний, предложенная Д. Е. Бондаревым (1 — масса динамического гасителя колебаний; 2 — трехмерный демпфер; 3 — трехмерный блок пружин) [12]

по сравнению с защищаемым зданием (от 15 до 20 % от веса сооружения) имеет наиболее высокий эффект сейсмозащиты. Также при изменении собственной частоты защищаемого сооружения динамический гаситель колебаний с большой массой дольше сохраняет свою эффективность по сравнению с гасителем малой массы. В исследовании рассматривались пяти-, десяти- и двадцати-этажные здания.

Анализ существующих решений по реализации динамических гасителей колебаний в виде надстраиваемых этажей свидетельствует о его различном характере исполнения. Это дает возможность использовать конструкцию гасителя и для других функций защиты, например, ветровой защиты. Для обоснования такого подхода требуется проведение дополнительных расчетно-теоретических исследований с учетом особенностей ветровой нагрузки, при этом возникает необходимость проверки не только защитных функций от ветровой нагрузки, но и влияния на параметры настройки динамического гасителя колебаний.

Выводы

Динамические гасители колебаний в зданиях в виде частей самого объекта

можно рассматривать как эффективное средство сейсмозащиты. При этом наилучшие результаты удастся получить при значительной массе гасителя — от 15 % веса сооружения. Для обеспечения комплексной защиты крыш зданий предлагается модифицировать конструкцию уже имеющегося гибкого верхнего этажа. Предлагается, с одной стороны, ввести в систему защиты дополнительные конструктивные элементы, позволяющие рассеивать ветровые потоки различного происхождения, с другой стороны, придать определенную форму динамическому гасителю колебаний и внести некоторые изменения в его конструкцию. Следует отметить, что в существующих исследованиях не в полной мере отражены вопросы изменения свойств гасителя в процессе эксплуатации, а также отсутствуют исследования влияния дополнительных факторов, таких как воздействия ветровых потоков в различных направлениях, образование наледей на крыше и др., влияющих на эксплуатационную надежность здания, что в целом может негативно отразиться на создании эффективной комплексной защиты объекта.

Библиографический список

1. Шульгин В. Н., Седнев В. А., Овсяник А. И., Платонов А. П., Шевчук А. Б. Инженерная защита населения. Ч. 1. Основы инженерной защиты населения и территорий. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 582 с.
2. Нестерова О. П., Уздин А. М. Эффективность динамических гасителей колебаний для массивных сооружений на скальных основаниях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 1. С. 20–25.
3. Нестерова О. П., Уздин А. М., Фрезе М. В. Учет демпфирования при подборе параметров динамических гасителей сейсмических колебаний // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 5 (60). С. 35–42.
4. Нестерова О. П. Особенности подбора параметров динамических гасителей сейсмических колебаний в зависимости от модели учета демпфирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 4. С. 8–22.
5. Нестерова О. П. Особенности расчета сооружений с динамическими гасителями колебаний по акселерограммам проектных землетрясений // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 48–53.
6. Нестерова О. П., Уздин А. М. Особенности работы динамических гасителей колебаний при силовом и кинематическом (сейсмическом) возмущении демпфированных сооружений // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. № 2 (92). С. 84–89.
7. Сафронова В. Ю., Пронина А. А., Уздин А. М. Эффективность надстройки гибкого верхнего этажа для повышения сейсмостойкости зданий на скальных основаниях // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с междунар. участием. Хабаровск, 19–22 апреля 2022 г. В 2 т. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2022. Т. 1. С. 483–487.
8. Богданова Г. А. Расчетно-теоретические исследования сейсмостойкости девятиэтажных зданий с динамическими гасителями колебаний // Известия Петербургского ун-та путей сообщения. 2006. № 2 (7). С. 18–25.
9. Мелкумян М. Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 5 (31). С. 23–29.
10. Хачиян Э. Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван: Гитутюн НАН РА, 2015. 555 с.

11. Поляков В. С., Килимник Л. Ш., Черкашин А. В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М.: Стройиздат, 1989. 320 с.
12. Bondarev D. E. Tuned mass damper for reduction seismic and wind loads // Magazine of Civil Engineering. 2024. Vol. 17 (5). 12904.
13. Корнев Б. Г., Резников Л. М. Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения. М.: Наука, 1988. 302 с.
14. А. с. 1507943 E04 H 9/02. Многоэтажное сейсмостойкое здание / Н. Н. Складнев, А. И. Цейтлин, Т. А. Киселева (СССР) // Открытия. Изобретения. 1989. № 34. С. 152–153.
15. Melkumyan M. G. Unique Concepts and Features of Seismic Isolation Systems. 1st ed. United Kingdom: B P International, 2022. 587 p.
16. Villaverde R., Eeri M. Roof Isolation System to Reduce the Seismic Response of Buildings: A Preliminary Assessment // Earthquake Spectra. 1998. Vol. 14 (3). Pp. 521–532.
17. Ли Сяосун. Метод гашения колебаний, использующий часть конструкции в качестве гасителя: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 31 с.

References

1. Shul'gin V. N., Sednev V. A., Ovsyanik A. I., Platonov A. P., Shevchuk A. B. *Inzhenernaya zashchita naseleniya. Ch. 1. Osnovy inzhenernoy zashchity naseleniya i territoriy* [Engineering protection of the population. Pt. 1. Fundamentals of engineering protection of population and territories]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Publ., 2009, 582 p.
2. Nesterova O. P., Uzdin A. M. *Effektivnost' dinamicheskikh gasiteley kolebaniy dlya massivnykh sooruzheniy na neskalykh osnovaniyakh* [Efficiency of dynamic vibration dampers for massive structures on non-rock foundations]. *Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2021, no. 1, pp. 20–25.
3. Nesterova O. P., Uzdin A. M., Freze M. V. *Uchet dempfirovaniya pri podbore parametrov dinamicheskikh gasiteley seysmicheskikh kolebaniy* [Taking into account damping in the selection of parameters of dynamic dampeners of seismic vibrations]. *Prirodnye i tekhnogennyye riski. Bezopasnost' sooruzheniy – Natural and man-made risks. Safety of structures*, 2022, no. 5 (60), pp. 35–42.
4. Nesterova O. P. *Osobennosti podbora parametrov dinamicheskikh gasiteley seysmicheskikh kolebaniy v zavisimosti ot modeli ucheta dempfirovaniya* [Features of selecting parameters of seismic vibration dynamic dampers depending on damping accounting model]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy –*

Earthquake resistant construction. Safety of structures, 2022, no. 4, pp. 8–22.

5. Nesterova O. P. *Osobennosti rascheta sooruzheniy s dinamicheskimi gasitelyami kolebaniy po akselerogrammam proektnykh zemletryaseniy* [Features of calculating structures with dynamic vibration dampers based on accelerograms of design basis earthquakes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 2 (73), pp. 48–53.

6. Nesterova O. P., Uzdin A. M. *Osobennosti raboty dinamicheskikh gasiteley kolebaniy pri silovom i kinematicheskom (seysmicheskom) vozmushchenii dempfirovannykh sooruzheniy* [Features of dynamic vibration dampers' operation at power and kinematic (seismic) disturbance of damped structures]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk – Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2016, no. 2 (92), pp. 84–89.

7. Safronova V. Yu., Pronina A. A., Uzdin A. M. *Effektivnost' nadstroyki gibkogo verkhnego etazha dlya povysheniya seysmostoykosti zdaniy na neskalknykh osnovaniyakh* [The effectiveness of the superstructure of a flexible upper floor aimed at increasing the seismic resistance of buildings on non-rock foundations]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. Trudy Vseros. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoy molodezhi s mezhdunar. uchastiem. Khabarovsk, 19–22 aprelya 2022 g.* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the 21st century. Proceeding of the All-Russia scientific-practical conference of creative youth with international participation. Khabarovsk, April 19–22, 2022]. In 2 vols. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2022, vol. 1, pp. 483–487.

8. Bogdanova G. A. *Raschetno-teoreticheskie issledovaniya seysmostoykosti devyatiyazhnykh zdaniy s dinamicheskimi gasitelyami kolebaniy* [Computational and theoretical studies of seismic resistance of nine-storey buildings with dynamic vibration dampers]. *Izvestiya Peterburgskogo un-ta putey soobshcheniya – Bulletin of the Petersburg University of Railways*, 2006, no. 2 (7), pp. 18–25.

9. Melkumyan M. G. *Issledovanie effektivnosti odno- i dvukhmassovogo dinamicheskogo gasitelya kolebaniy na modeli karkasnogo zdaniya pri vibratsionnykh ispytaniyakh* [Study of the effectiveness of a single and dual-mass dynamic vibration damper on a frame building model during vibration tests]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and Construction Journal*, 2012, no. 5 (31), pp. 23–29.

10. Khachiyani E. E. *Seysmicheskie vozdeystviya i prognoz povedeniya sooruzheniy* [Seismic impacts and forecast of structures behavior]. Erevan, Gitutyun NAN RA Publ., 2015, 555 p.

11. Polyakov B. C., Kilimnik L. Sh., Cherkashin A. B. *Sovremennye metody seysmozashchity zdaniy* [Modern methods of seismic protection of buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989, 320 p.

12. Bondarev D. E. Tuned mass damper for reduction seismic and wind loads. *Magazine of Civil Engineering*, 2024, vol. 17 (5), 12904.

13. Kornev B. G., Reznikov L. M. *Dinamicheskie gasiteli kolebaniy. Teoriya i tekhnicheskie prilozheniya* [Dynamic vibration dampers. Theory and technical applications]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 302 p.

14. Skladnev N. N., Tseytlin A. I., Kiseleva T. A. *Mnogoetazhnoe seysmostoykoe zdanie* [Multi-storey earthquake-resistant building]. *Otkrytiya. Izobreteniya – Discoveries. Inventions*, 1989, no. 34, pp. 152–153.

15. Melkumyan M. G. *Unique Concepts and Features of Seismic Isolation Systems*. 1st ed. United Kindom, B P International, 2022, 587 p.

16. Villaverde R., Eeri M. Roof Isolation System to Reduce the Seismic Response of Buildings: A Preliminary Assessment. *Earthquake Spectra*, 1998, vol. 14 (3), pp. 521–532.

17. Li Syaosun. *Metod gasheniya kolebaniy, ispol'zuyushchiy chast' konstruksii v kachestve gasitelya*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Method of damping vibrations using part of the structure as a damper. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1993, 31 p.