

## **ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИИ**

*Константин Владимирович Федин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, старший преподаватель каф. геофизики; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса 20, доцент каф. геофизики.

*Елизавета Эдуардовна Косякина*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20, студент Физико-технического факультета, кафедры геофизических систем, e-mail: lilavati21@mail.ru

В статье приведены результаты натурных экспериментов по изучению влияния собственных частот в грунте и постоянного внешнего воздействия с течением времени на устойчивость инженерных сооружений. Показано, что частотно-амплитудный спектр собственных колебаний исследуемого многоэтажного жилого здания с течением времени не изменяется.

**Ключевые слова:** сейсмобезопасность, собственные колебания здания, резонансные свойства приповерхностных грунтов, сезонные изменения, пассивные сейсмические наблюдения

## **ASSESSMENT OF THE SEISMIC SAFETY OF ENGINEERING STRUCTURES BASED ON ACOUSTIC NOISE**

*Konstantin V. Fedin*

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Koptuyuga 3, PhD, Senior Researcher, e-mail: fedinkv@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, Senior Lecturer of the Department of Geophysics; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Avenue 20, Associate Professor of the Department of Geophysical Systems

*Elizaveta E. Kosyakina*

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Avenue 20, Student of the Faculty of Physics and Technology, Department of Geophysical Systems, e-mail: lilavati21@mail.ru

The article presents the results of field experiments on the influence of the natural frequencies in the soil and constant exposure to the outside over time for stability engineering structures. It is shown that the frequency-amplitude spectrum of the natural oscillations of the investigated multi-storey residential building does not change over time.

**Keywords:** seismic safety, natural oscillations of the building, resonance properties of near-surface soils, seasonal changes, passive seismic observations

Инженерная сейсмология содержит методы исследований реакции сооружений на сейсмическое воздействие. В них входят: тестирование ударом [1], когда измеряется отклик системы на удар, снабжённый датчиком для записи колебаний; испытания зданий с мощными вибраторами, где силовая камера центрального вибратора устанавливается на крыше и в монохроматическом режиме с набором заданных интенсивностей осуществляется раскачивание здания до разрушения, а также вибрационное тестирование здания источником, размещённым за пределами инженерного сооружения [2]; исследование колебаний здания под воздействием промышленных взрывов [3]; исследование реакций инженерных сооружений на землетрясения [4,5,6,7]; исследование инженерных сооружений на базе изучения микросейсмических колебаний [8].

В процессе эксплуатации инженерных объектов также могут происходить изменения собственных частот вследствие различных изменений их конструкции (возникновения дефектов, естественного старения и прочего) [9,10]. Небольшие изменения собственных частот могут происходить и в течение относительно коротких временных отрезков, например, под влиянием сезонных изменений климатических условий [11, 12]. Поэтому при обследовании и мониторинге технического состояния зданий и сооружений, значительная роль отводится экспериментальным методам определения собственных частот и форм колебаний таких объектов.

Авторами работы [8] было проведено исследование о зависимости устойчивости инженерных сооружений от резонанса приповерхностных грунтов. Результаты проведённых в данной работе экспериментов по выявлению собственных частот жилого десятиэтажного здания и верхнего слоя земной поверхности определялись по данным сейсмоакустических измерений. В итоге при накоплении амплитудных спектров шумовых записей (без активных источников), зарегистрированных на несущей стене здания, и регистрации собственных частот приповерхностных грунтов вблизи сооружения, была определена зависимость влияния собственных частот в грунте на собственные частоты здания. Также было установлено, что резонанс приповерхностных грунтов зависит от сезонных изменений температур.

Поскольку одна из низших мод (3.17 Гц) собственных колебаний здания зимой совпала с собственными частотами в грунте в зимний период (летом совпадения отсутствуют), были проверены измерения частотно-амплитудного характера исследуемого объекта с течением времени, т.к. существует вероятность, что в случае землетрясения здание может войти в резонанс (т.к. его собственная частота колебаний может совпасть с одной из частот собственных колебаний верхней поверхности грунта). А также на определенной частоте, в зависимости прочности материалов конструкции, может произойти образование трещин в местах пучностей на частотно-амплитудном распределении вдоль несущей стены здания, что в свою очередь может привести к обрушению конструкции здания.

В связи с этим в рамках данной работы проведено повторное исследование для оценки постоянного внешнего воздействия (со стороны железнодорожных

путей и автомагистрали М52) на сейсmobезопасность конструкции исследуемого сооружения, находящегося по адресу г. Новосибирск, ул. Разъездная, д.10.

Ранее, при обследовании этого здания нами была использована методика, которая заключается в том, что мы производим регистрацию акустических шумов, образованных от внешних источников на несущей стене. Затем акустические шумы разбиваются на фрагменты (блоки). В нашем случае один фрагмент состоит из 8192 отсчёта. Время регистрации данных составляет 30 мин, после этого времени амплитудные характеристики не меняются. Исследования проводились в два периода времени года: летом и зимой.

В каждом таком фрагменте считаются амплитудные спектры, затем они суммируются, в результате получается усреднённый амплитудный спектр, на котором видны резкие когерентные пики, которые соответствуют собственным частотам исследуемого здания. Пример такого спектра приведён на рис. 1.

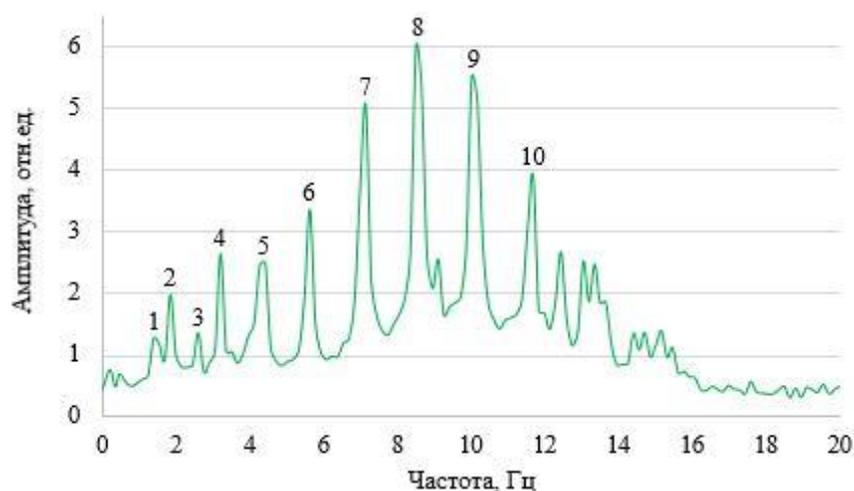


Рис. 1. Усреднённый амплитудный спектр шумовых записей, зарегистрированных в здании летом 2020 года

При построении частотно-амплитудного распределения вдоль стены для каждой точки измерения считается усреднённый спектр. В программе Surfer с помощью метода интерполяции “Triangulation with Linear Interpolation” строится частотно-амплитудное распределение по высоте здания.

Измерения проводились с помощью одноканальных цифровых регистраторов Texan (RefTek-125A) с горизонтальными геофонами GS-20DX. Частота дискретизации при регистрации составляла 1 кГц. Следует отметить, что чувствительность геофонов на частотах ниже 10 Гц резко снижается. Однако, как было показано в работе [8], накопление большого количества амплитудных спектров шумовых записей позволяет выделять стоячие волны даже с более низкими частотами.

Также стоит отметить, что уровень шумового воздействия на находящиеся вблизи от железнодорожных путей инженерные сооружения находится в

диапазоне частот приблизительно от 1 до 300 Гц [13]. Шумовое воздействие в таком диапазоне частот позволяет при регистрации данных получать все интересные нас когерентные пики.

По результатам измерений, наглядно видно резкое увеличение амплитудных составляющих, которое чётко можно наблюдать из сравнения построенных обобщённых амплитудных спектров в здании (рис. 2, а, б).

На частотно-амплитудном распределении вдоль несущей стены наблюдается резкое увеличение амплитуды начиная с 5 до 7 этажа, которое может быть связано с несколькими факторами:

- воздействие акустического шума от железнодорожных путей дало изменение картины распределения амплитудных спектров исследуемого сооружения;
- есть вероятность того, что при ремонтных работах, проведённых в период с 2018 по 2020 год, была повреждена несущая строительная конструкция здания.

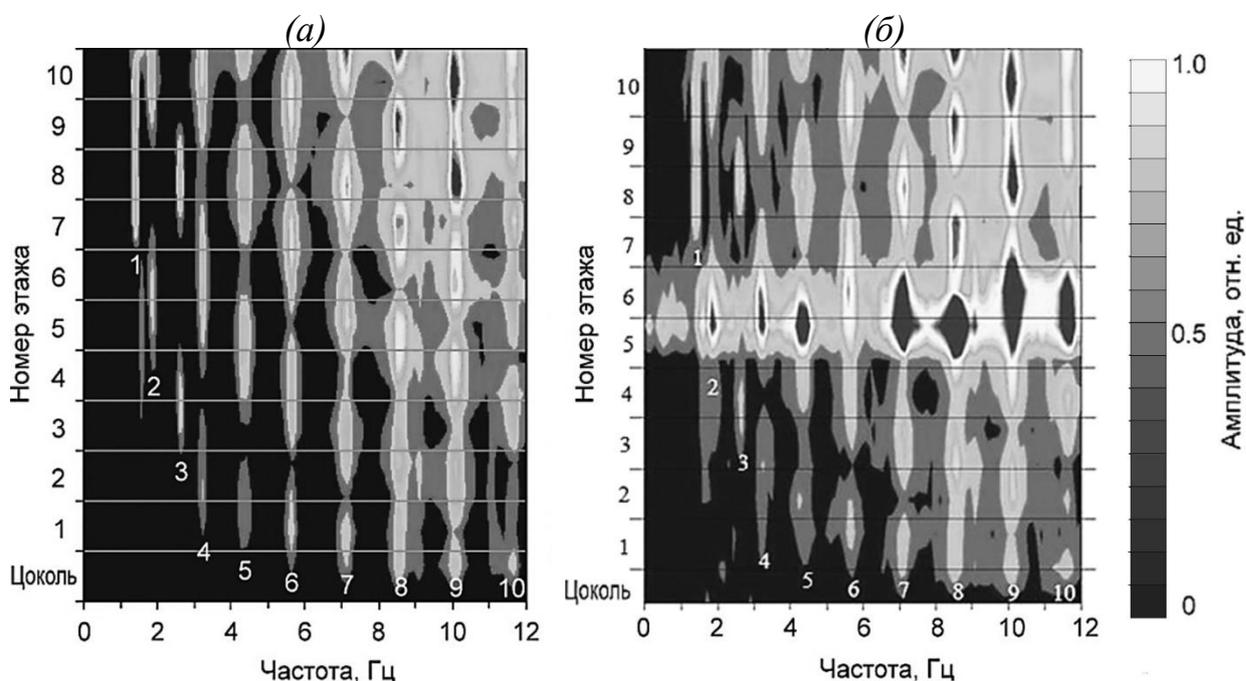


Рис. 2. Сравнение распределений амплитудных спектров по высоте здания, измеренных в 2018 (а) и 2020 (б) годах

Были построены нормированные обобщенные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в доме, и проведено их сравнение за 2018 и 2020 года (рис. 3).

Совместная визуализация распределения амплитудных спектров по высоте здания и обобщенного нормированного амплитудного спектра шумовых записей даёт нам более полную картину для оценки, а также позволяет убедиться, что наблюдаемые на амплитудных спектрах пики соответствуют именно стоячим волнам. Аналогичные результаты были получены при физическом и численном моделировании столбчатого типа здания.

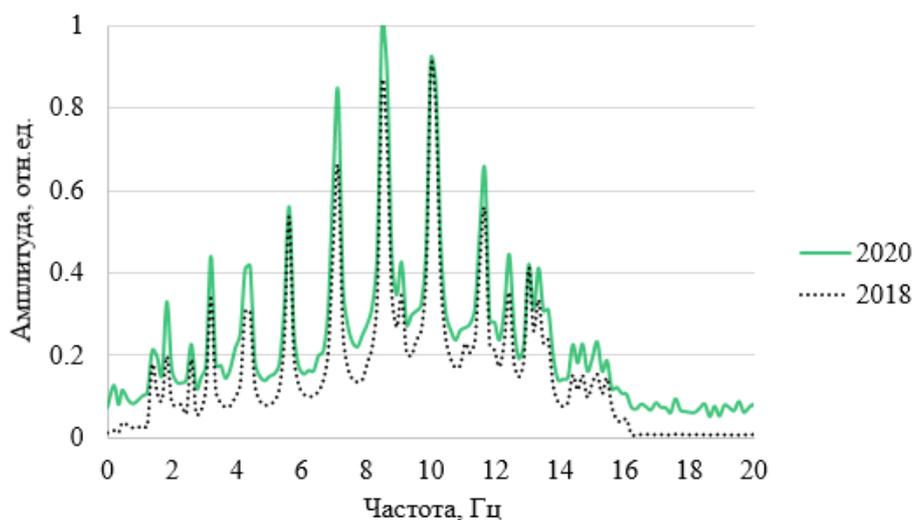


Рис. 3. Нормированные обобщённые амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании летом 2018 и 2020 годах

Что же касается колебаний верхнего разреза грунта, то по полученным зимой данным (рис. 4) первая сильная мода появляется на частоте 3,22 Гц, ранее она находилась на частоте равной 3,17 Гц.

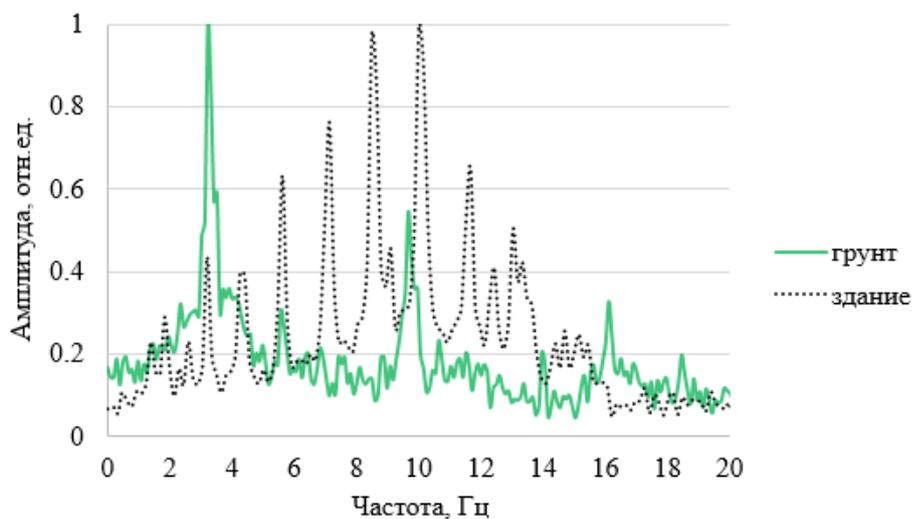


Рис. 4. Нормированный обобщённый амплитудный спектр шумовых записей, зарегистрированных в грунте и в здании зимой в 2020 году

Частота грунта меняется в течении года, т.к. зависит от климатических условий, и в какой-то период часть мод будут воздействовать гораздо сильнее на здание, т.к. частоты дома будут совпадать с грунтовыми характеристиками.

В зависимости от типа инженерных сооружений бывают разные формы колебаний. По строительным нормам и правилам [14] рекомендуется обращать внимание на низшие моды собственных колебаний (предпочтительно на горизонтальный тип колебаний).

В зимний период частота (3,22 Гц) одной из низших мод частотно-амплитудного спектра грунта практически совпадает с частотой четвертой моды здания, что приводит к усилению возможных резонансных воздействий на данной частоте. В случае землетрясения существует вероятность, что здание может войти в резонанс и в зависимости прочности материалов конструкции, возможно образование трещин в местах пучностей на частотно-амплитудном распределении вдоль несущей стены здания, что в свою очередь может привести к обрушению здания.

Результаты проведенных измерений наглядно показали, что частотно-амплитудный спектр собственных колебаний исследуемого здания не изменился с течением времени. При этом в зимний период частота одной из низших мод колебаний приповерхностных грунтов практически совпадает с собственной частотой здания. По сравнению с 2018 годом в 2020 году было замечено резкое увеличение амплитудного спектра с 5 по 7 этажи здания, что свидетельствует о снижении устойчивости данной области. Следовательно, накопление амплитудных спектров может наглядно демонстрировать определение ослабленных зон в конструкции инженерного сооружения.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что необходимо при проектировании различных сооружений учитывать влияние колебаний приповерхностных грунтов и постоянное внешнее воздействие, особенно в районах с ярко выраженной сезонностью и в сейсмоопасных регионах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Есенина Н.А., Ларионов В.И., Нигметов Г.М., Ситников И.В., Сотин В.Н., Суцев С.П., Шахраманьян М.А. Способ динамических испытаний зданий и сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RU 2141635 С1, 20.11.1999. Заявка № 99105726/28 от 30.03.1999.
2. Румянцев А.А., Сергеевцев Е.Ю. Вибрационные испытания 16-этажного жилого дома объемно-блочной конструкции // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5. – С. 98—102.
3. Шеметова Е.О., Ваганова-Вилькинс Е.А., Филипова Е.О. Оценка уровня сейсмического воздействия промышленных взрывов на окружающую застройку // Вологодские чтения. – № 5. – 2008. – С. 83-86.
4. Pioldi F., Ferrari R., Rizzi E. Seismic FDD modal identification and monitoring of building properties from real strong-motion structural response signals // Structural Control & Health Monitoring. – 2017. – V.24. – I.11. – № e1982.
5. Brunelli A., de Silva F., Piro A. et al. Numerical simulation of the seismic response and soil-structure interaction for a monitored masonry school building damaged by the 2016 Central Italy earthquake // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2021. – V19. – I2. – PP.1181-1211.

6. Clemente P., Bongiovanni G., Buffarini G. et al. Monitored Seismic Behavior of Base Isolated Buildings in Italy // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP. 115-137.
7. Fujino Yozo, Siringoringo Dionysius M., Kikuchi Masaru et al. Seismic Monitoring of Seismically Isolated Bridges and Buildings in Japan-Case Studies and Lessons Learned // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP.407-447.
8. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л. О влиянии сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. – 2019. – № 3. – С. 57-64.
9. Carden E.P., Fanning P. Vibration based condition monitoring: a review // *Structural Health Monitoring*. – 2004. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 355–377.
10. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – Vol. 96, No. 1, P. 237–257.
11. Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов В.Б. Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // *Геофизические исследования*. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 31–42.
12. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2014. – № 2. – С. 153–167.
13. ГОСТ Р ИСО 14837-1-2007. Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство. М.: Стандартинформ, 2008. – 39 с.
14. Ведяков И.И., Чернов Ю.Т., Арутюнян М.В., Крылова О.В., Арутюня А.М. СП 413.1325800.2018 Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования // М.: Стандартинформ, 2019.

## REFERENCES

1. Esenina N.A., Larionov V.I., Nigmatov G.M., Sitnikov I.V., Sotin V.N., Sushhev S.P., Shahravan'jan M.A. Sposob dinamicheskikh ispytaniy zdaniy i sooruzhenij i ustrojstvo dlja ego osushhestvleniya // Patent na izobretenie RU 2141635 C1, 20.11.1999. Zajavka № 99105726/28 ot 30.03.1999.
2. Romyancev A.A., Sergeevcev E.YU. Vibracionnye ispytaniya 16-etazhnogo zhilogo doma ob"emno-blochnoj konstrukcii // *Vestnik MGSU*. – 2012. – № 5. – S. 98—102.
3. SHemetova E.O., Vaganova-Vil'kins E.A., Filipova E.O. Ocenka urovnya sejsmicheskogo vozdejstviya promyshlennyh vzryvov na okruzhayushchuyu zastrojku // *Vologdinskie chteniya*. – № S. – 2008. – S. 83-86
4. Pioldi F., Ferrari R., Rizzi E. Seismic FDD modal identification and monitoring of building properties from real strong-motion structural response signals // *Structural Control & Health Monitoring*. – 2017. – V.24. – I.11. – № e1982
5. Brunelli A., de Silva F., Piro A. et al. Numerical simulation of the seismic response and soil-structure interaction for a monitored masonry school building damaged by the 2016 Central Italy earthquake // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2021. – V19. – I2. – PP.1181-1211
6. Clemente P., Bongiovanni G., Buffarini G. et al. Monitored Seismic Behavior of Base Isolated Buildings in Italy // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP. 115-137
7. Fujino Yozo, Siringoringo Dionysius M., Kikuchi Masaru et al. Seismic Monitoring of Seismically Isolated Bridges and Buildings in Japan-Case Studies and Lessons Learned // *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. – 2019. – PP.407-447
8. Kolesnikov Ju.I., Fedin K.V., Ngomajezve L. O vlijanii sezonnyh izmenenij rezonansnyh svojstv pripoverhnostnyh gruntov na sejsmbezopasnost' sooruzhenij // *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. – 2019. – № 3. – S. 57-64

9. Carden E.P., Fanning P. Vibration based condition monitoring: a review // *Structural Health Monitoring*. – 2004. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 355–377.
10. Clinton J.F., Bradford S.C., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – Vol. 96, No. 1, P. 237–257.
11. Marchenkov A.Yu., Kapustyan N.K., Smirnov V.B. Opyt registracii sejsmicheskogo vozdejstviya na vysotnoe zdanie MGU // *Geofizicheskie issledovaniya*. – 2015. – T. 16, № 3. – S. 31–42.
12. Korepanov V.V., Cvetkov R.V. Sezonnnye izmeneniya sobstvennyh chastot kolebanij zdaniya na svajnom fundamente // *Vestnik PNIPU. Mehanika*. – 2014. – № 2. – S. 153–167.
13. GOST R ISO 14837-1-2007. Vibracija. Shum i vibracija, sozdavaemye dvizheniem rel'sovogo transporta. Chast' 1. Obshee rukovodstvo. M.: Standartinform, 2008. – 39 s.
14. Vedjakov I.I., Chernov Ju.T., Arutjunjan M.V., Krylova O.V., Arutjunja A.M. SP 413.1325800.2018 Zdanija i sooruzhenija, podverzhennye dinamicheskim vozdejstvijam. Pravila proektirovanija // M.: Standartinform, 2019

© К. В. Федин, Е. Э. Косякина, 2021