

УДК: 697.322
OECD: 02.01.FA

Исследование структурного шума при применении нескольких контуров плавающего пола в крышных котельных

Плотников А.С.^{1*}, Жилина Т.С.², Афонин К.В.³, Сайфуллин А.А.⁴

¹ Старший преподаватель, ² К.т.н., профессор, ³ К.т.н., доцент

^{1,2,3} Кафедра ТГВ, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, РФ

⁴ Ведущий инженер-конструктор ООО «Архитектурно-инженерная группа ИСТ», г. Тюмень, РФ

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования в программном комплексе STARK ES воздействия вынужденных колебаний на упрощенную модель крышной котельной - прямоугольную плиту, воспринимающую колебания от оборудования. Показаны результаты практических замеров вынужденных колебаний оборудования крышной котельной мощностью N-2,0 МВт, оборудованной «плавающим полом» с демпферными прокладками. Котельная расположена на кровле гражданского здания. Отличительная особенность метода «плавающий пол» состоит в устройстве массивной стяжки из бетона или цементно-песчаной смеси, уложенной на межэтажное перекрытие поверх слоя упругого материала с разграничением связей. Демпферные прокладки расположены по периметру между горизонтальными и вертикальными строительными конструкциями. Применение предлагаемого метода приведет к снижению передачи вынужденных колебаний от оборудования на строительные конструкции здания котельной. Это позволит исключить передачу в здание структурного шума.

Ключевые слова: крышные котельные, шум, плавающий пол, колебания, виброскорость.

Investigation of structure-borne noise when using multiple floating floor contours in roof-top boilers

Plotnikov A.S.^{1*}, Zhilina T.S.², Afonin K.V.³, Sayfullin A.A.⁴

¹ Senior lecturer, ² PhD, professor, ³ PhD, assistant professor

^{1,2,3} The department of HVAC, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

⁴ Chief civil engineer LTD «Architectural - Engineering Group IST», Tyumen, Russia

Abstract

The article presents the results of modeling the impact of induced vibrations on a simplified model of a rooftop boiler room performed in the STARK ES software package. A simplified model is given as a rectangular plate that perceives vibrations from equipment. Results demonstrate practical measurements of induced vibrations of equipment in a rooftop boiler room with a capacity of N-2.0 MW, equipped with a "floating floor" with damping pads. The boiler room is located on the roof of a civil building. A distinctive feature of the "floating floor" method is in the construction of a massive connecting bar made of concrete or cement-sand mixture. It is placed on the interfloor overlapping over a layer of elastic material with delimitation of bonds. Damper pads are located around the perimeter between horizontal and vertical building structures. The application of the proposed method will lead to a decrease in the transmission of induced vibrations from

the equipment to the building structures of the boiler room building. This will eliminate the transmission of structure-borne noise into the building.

Keywords: *roof-top boilers, noise, floating floor, vibrations, vibration velocity.*

Введение

Заданный вектор развития городов Российской Федерации обуславливает высокий уровень урбанизации, увеличение плотности застройки и требует высокой надежности систем инженерно-технологического обеспечения, соответствующей нормативному уровню акустического воздействия на человека при эксплуатации оборудования. С учетом особенностей климата нашей страны одной из важных систем является система теплоснабжения [1].

Увеличение числа автономных источников теплоснабжения (АИТ) - крышных котельных является важнейшей составляющей развития генерации тепла в системах ЖКХ [2]. Одной из основных проблем устройства такого типа инженерных сооружений, входящих в состав гражданских зданий, является передача вынужденных колебаний от оборудования, находящегося в «работе» на строительные конструкции всего здания в целом. Важным технологическим аспектом при устройстве крышных котельных является выполнение нормативных требований по акустическому воздействию эксплуатируемого оборудования крышной котельной на жилое здание, а значит и на людей, живущих в нем. Поэтому в зданиях и сооружениях для создания комфорта необходимо решать задачи по снижению воздействия параметров шума и вибрации «по месту», если источники шума связаны с деятельностью инженерных систем и технологического оборудования системы теплоснабжения, согласно требованиям СП 51.13330.2011 [14]. Существующие методы решения проблемы представлены устройством «плавающего пола» с двумя контурами в помещении котельной.

Цель статьи – предложения по уменьшению показателей шума и вибрации в автономных источниках теплоснабжения как на стадии проекта, так и на эксплуатируемых объектах.

1. Описание проблемы

Источники вибрации и шума оборудования – вращающиеся механизмы, пульсации потока в элементах воздушных каналов и жидкости в трубах. При наличии жестких связей эти источники возбуждают вибрацию соединенных с ними конструкций. Так, под воздействием вибрации возбуждаются колебания перекрытия, которые затем передаются на другие строительные конструкции. Кроме того, при жестком соединении вибрационноактивного оборудования неизбежно распространение структурного шума на соединительные трубы и воздуховоды, а по ним – на строительные конструкции.

По результатам анализа научных исследований [15,16], направленных на снижение виброакустического воздействия в источнике отмечена эффективность метода «плавающий пол» с одноконтурным периметральным расположением в помещениях с инженерным оборудованием одного типа (насосные, вентиляционные камеры). Основные положения метода представлены в работах Блохиной И. П. [3], Гусева В. П. [4]. Расчетная модель такого воздействия – прямоугольная плита, воспринимающая вынужденные колебания от инженерного оборудования и в меньшей степени передающая виброакустические колебания на перекрытие гражданского здания с жилыми помещениями [17]. В то же время отсутствуют исследования по применению

метода «плавающий пол» в помещениях с разным типом инженерного оборудования (ИТП, ЦТП, АИТ).

2. Экспериментальные исследования

Авторами статьи выполнены следующие измерения общего уровня виброскорости по вертикальной оси располагая акселерометр на оборудовании и поверхности пола крышной котельной. Фиксация показателей выполнена с помощью акселерометра. Способ крепления акселерометра – клеевая основа согласно положениям [5]. Измерительный комплекс – марки «Ассистент» завода НТМ-ЗАЩИТА производства РФ. В ходе проведения эксперимента комплекс был метрологически поверен.

Экспериментальные исследования проводились в крышной котельной:

- без плавающего пола в двух периодах времени согласно нормативным требованиям (07-23 ч; 23-07 ч);

- с двумя контурами «плавающего пола» в двух периодах времени согласно нормативным требованиям (07-23 ч; 23-07 ч) [9,10].

Используемая методика измерений представлена в инструкции по эксплуатации измерительного комплекса – марки «Ассистент» завода НТМ-ЗАЩИТА и по данным литературы [10].

После этого для цифровизации эксперимента в программном комплексе STARK ES выполнено моделирование воздействия вынужденных колебаний на упрощенную модель крышной котельной – прямоугольную плиту.

Типовая схема расположения оборудования в крышной котельной представлена на рисунке 1.

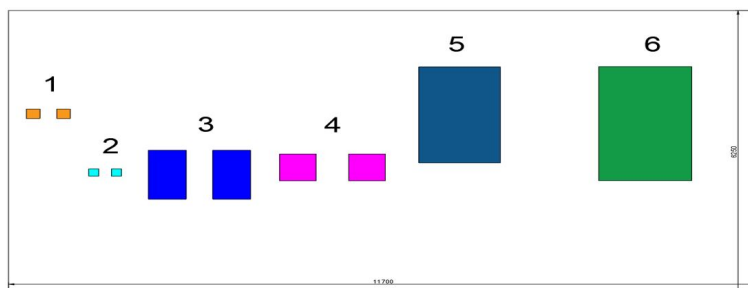


Рис. 1. Типовая схема оборудования в котельной

1 – Циркуляционные насосы системы отопления; 2 – Циркуляционные насосы системы ГВС I зоны; 3 – Циркуляционные насосы котлового контура; 4 – Циркуляционные насосы системы ГВС II зоны; 5 - котельная установка №1; 6 – котельная установка №2

Состав конструкций пола котельной, воспринимающего динамические нагрузки, представлен на рисунке 2.

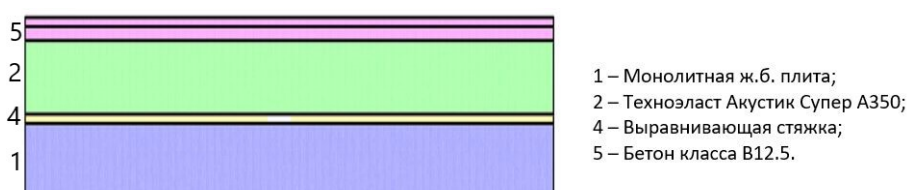


Рис. 2. Состав конструкций пола котельной

Физические свойства материалов:

1–Монолитная ж.б. плита $h=400\text{мм}$ ($E=23000$ МПа; $N=0.2; G=9,6$ МПа; $\rho=2500$ кг/м³); 2 – Техноэласт Акустик Супер А350 $h=350\text{мм}$ ($E=0.15$ МПа; $N=0.22; G=0.062$ МПа; $\rho=23$ кг/м³); 4 – Выравнивающая стяжка $h=20\text{мм}$ ($E=12000$ МПа; $N=0.15; G=5.6$ МПа; $\rho=800$ кг/м³); 5 – Бетон класса В12.5 $h=100\text{мм}$ ($E=21500$ МПа; $N=0.17, G=8.9$ МПа, $\rho=2275$ кг/м³).

Выполненные измерения вибрации (виброскорости V_z [мм/с]) представлены на рисунке 3.

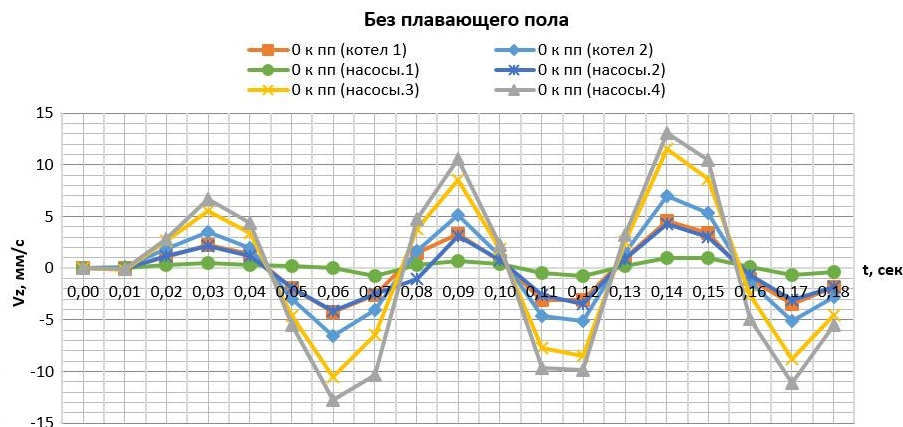


Рис. 3. Показатели вынужденных колебаний оборудования

Измерение уровней звука, L [дБ] крышной котельной, представленные на рисунке 4, выполнялись согласно методике, ученого Овчинникова С.Н. [9]. Место проведения измерений – помещение крышной котельной. Расположение точек измерения – периметральное. Измерения уровня звука выполнено виброакустическим прибором марки «Ассистент» завода НТМ-ЗАЩИТА. Измерения проведены в два нормируемых периода суток: 07-23 ч; 23-07 ч.

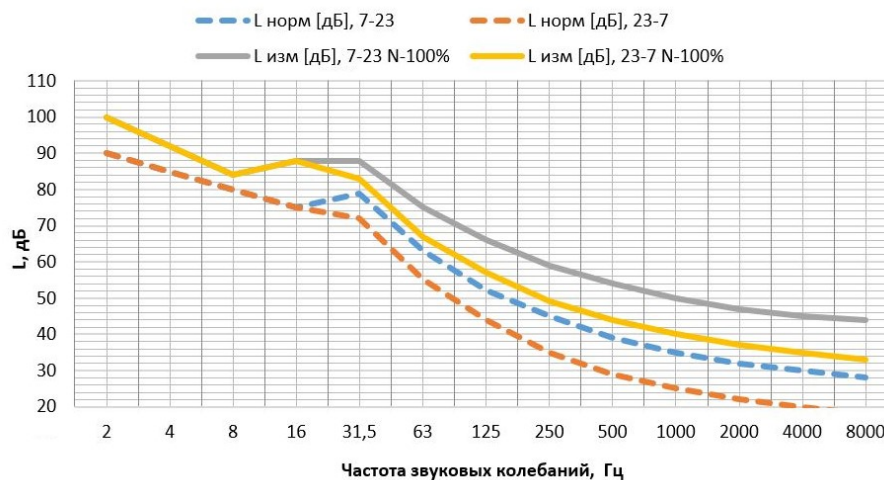


Рис. 4. Показатели звуковой нагрузки крышной котельной

Для сравнения корректности показателей виброперемещения и виброскорости представлен известный перевод значений [17]:

$$L_v = L_s + 20 \lg f - 60 \quad (1)$$

$$L_s = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0} \quad (2)$$

Где, L_v - уровень виброскорости [дБ], L_s - уровень вибросмещения [дБ], f - частота измеряемого сигнала вибрации [Гц], v — измеряемый (расчетный) параметр виброскорости [мм/с]; v_0 — начальное (пороговое) значение виброскорости ($5 \cdot 10^{-5}$ [мм/с]).

Для выполнения моделирования в программе были учтены физические свойства строительных материалов: E - модуль упругости, [МПа]; μ - коэффициент Пуассона; G - модуль сдвига [МПа]; ρ - плотность материала [кг/м³] и данные о вынужденных колебаниях от оборудования крышной котельной.

Таблица 1

Показатели частоты колебаний и параметры оборудования в крышной котельной

Номер (см. рис. 1)	f , Гц	S , кв.м	N , шт.	γ , кН/кв.м	A , кН
1	25	0,04	4	37	0,37
2	45	0,0256	4	37	0,0512
3	25	0,04	4	37	0,37
4	25	0,04	4	37	0,37
5	16	3,6465	60	7,0	0,43
6	18	2,6875	40	6,7	0,45

Где, S - площадь опирания оборудования на расчетной модели; N - количество узлов опирания на расчетной модели; f - частота работы динамически активного оборудования, γ - удельный вес оборудования при опирании на узел расчетной сетки расчетной модели; A - единичный показатель амплитуды, характеризуемый, как отношение воздействия оборудования в кН на количество узлов опирания оборудования. Сравнение измеренных показателей и значений, полученных по итогам моделирования в программе STARK ES, представлены на рисунке 5.

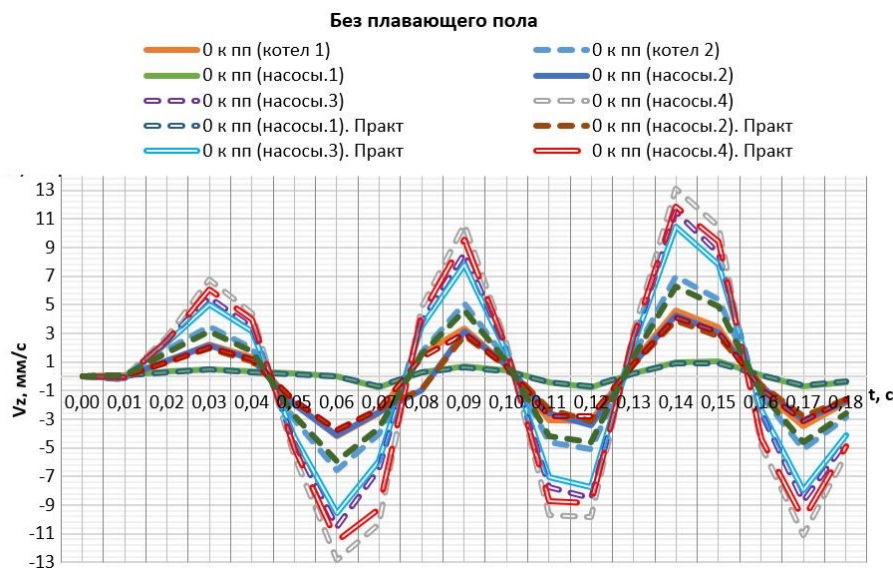


Рис. 5. Сравнение показателей виброскорости

Анализ данных на графике показывает погрешность экспериментальных и смоделированных в расчетной модели данных на уровне 6-8%. Результаты моделирования находятся в допустимом уровне погрешности.

Технические решения по устройству плиты приняты с учетом известных положений метода «плавающий пол», снижающих передачу вынужденных колебаний от оборудования на строительные конструкции котельной с последующей передачей в здание структурного шума [5].

3. Результаты моделирования в ПК STARK ES

На основании проанализированных данных предложено решение разделить оборудование по типам звуковых нагрузок, выделив в отдельный контур внутри основного периметрального контура котельные установки, оборудованные горелками. Основанием для такого расчета является большой объем жидкости, сосредоточенный в ограниченном пространстве, а процессы течения и процессы горения в ограниченном пространстве создают источник виброакустического воздействия с различными спектрами частоты звука [6,7].

Далее были проанализированы результаты моделирования В ПК STARK ES вынужденных колебаний на примере упрощенной модели крышной котельной - прямоугольной плиты, с воздействием находящегося в «работе» оборудования и устройством двух контуров «плавающего пола». Состав конструкций и разрез плиты в основании котельной представлен на рисунке 6.

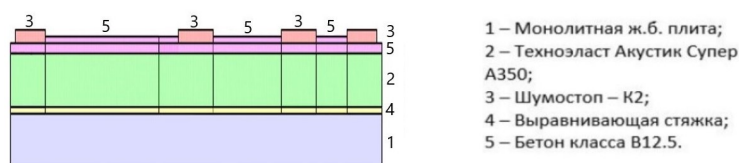


Рис. 6. Состав конструкций пола котельной с демпферными прокладками

Физические свойства материалов:

1 - Монолитная ж.б. плита $h=200$ мм ($E = 23000$ МПа; $N = 0.2$; $G = 9.6$ МПа; $\rho = 2500$ кг/м³); 2 - Техноэласт Акустик Супер А350 $h=350$ мм ($E = 0.15$ МПа; $N = 0.22$; $G = 0.062$ МПа; $\rho = 23$ кг/м³); 3 - Шумостоп-К2 $h=80$ мм, $b=300$ мм ($E = 0.56$ МПа; $N = 0.26$; $G = 0.23$ МПа; $\rho = 100$ кг/м³); 4 - Выравнивающая стяжка $h=20$ мм ($E = 12000$ МПа; $N = 0.15$; $G = 5.6$ МПа; $\rho = 1800$ кг/м³); 5 - Бетон класса В12.5 $h=60$ мм ($E = 21500$ МПа; $N = 0.17$; $G = 8.9$ МПа, $\rho = 2275$ кг/м³).

Схема расположения контуров «плавающего пола» представлена на рисунке 7.

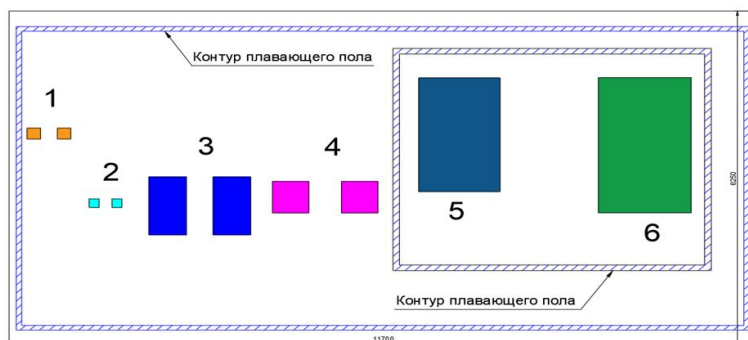


Рис. 7. План котельной с «плавающим полом»

1 - Циркуляционные насосы системы отопления; 2 - Циркуляционные насосы системы ГВС I зоны; 3 - Циркуляционные насосы котлового контура; 4 - Циркуляционные насосы системы ГВС II зоны; 5 - котельная установка №1; 6 - котельная установка №2

Показатели виброскорости V_z (мм/с) оборудования при устройстве двух контуров «плавающего пола».

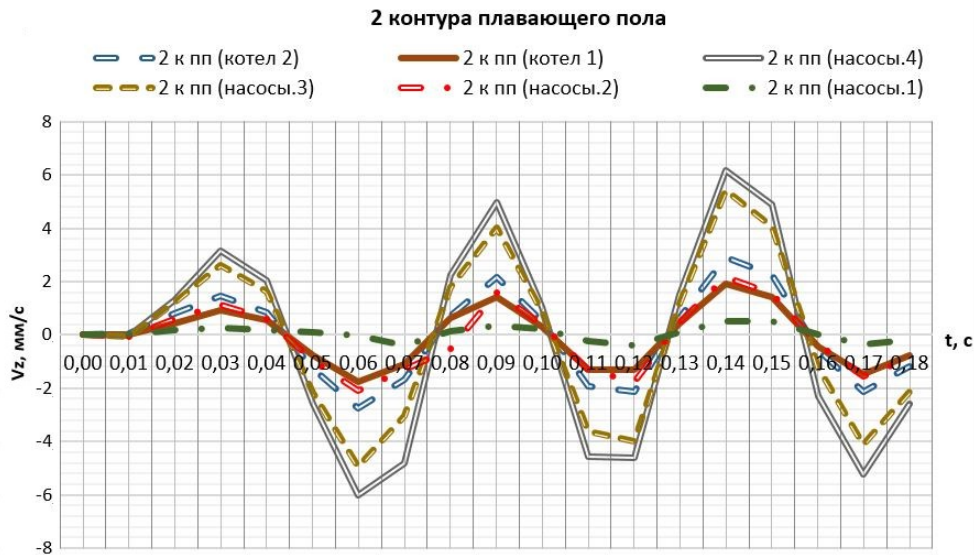


Рис. 8. Показатели виброскорости точек плиты с двумя контурами «плавающего пола»

Полученные в результате обработки по методу ряда Фурье данные показателей звука в котельной с двухконтурным «плавающим полом» после обработки представлены на рисунке 9.

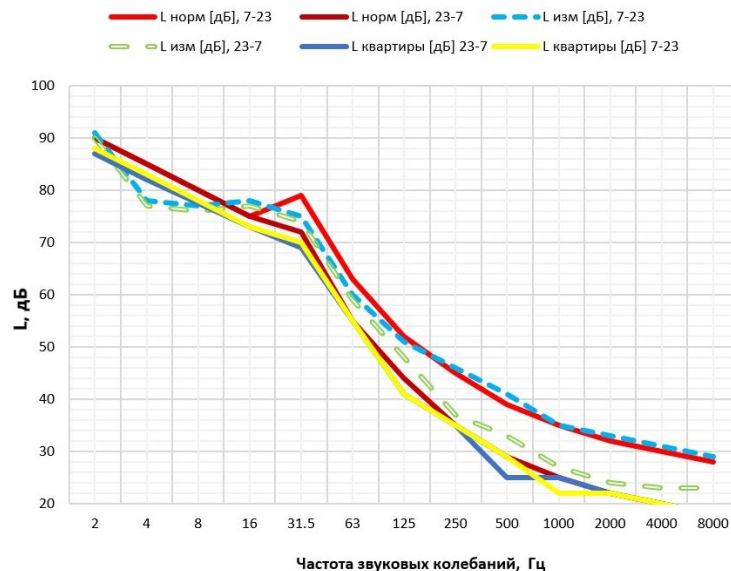


Рис. 9. Данные о звуковой нагрузке в октавных частотах с двумя контурами «плавающего пола»

Представленные на рисунке 9 результаты измерений уровня звукового давления в помещении жилой квартиры показывают снижение уровня звукового давления до нормируемых показателей для жилых помещений [11,12]. Уровень снижения показателей звукового давления при применении двух контуров «плавающего пола» находится на уровне 15-30% в зависимости от частоты звуковых колебаний.

Заключение

1. Авторами предложено к применению два контура плавающего пола котельной, которые позволяют снизить показатели звукового давления в зависимости от частоты звуковых колебаний на уровне 15-30% (см. рис. 9) в инженерном сооружении и в помещениях жилых квартир.
2. В программном комплексе STARK ES смоделированы вибрационные и звуковые нагрузки эксплуатируемой крышной котельной.
3. По результатам проведенного моделирования и экспериментальных исследований показана необходимость применения защиты от виброакустического воздействия в источнике шума и вибрации.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утр. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р / Институт энергетической стратегии. [электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 20.04.2019).
2. О ситуации с теплоснабжением в РФ: отчет / Фонд энергетического развития. 2016 г. Москва. URL: <http://www.energosovet.ru/stat880.html> (15.04.2018).
3. Блохина И.П. Динамические свойства звукоизоляционных материалов для плавающих полов / В кн.: Борьба с шумами и вибрациями. М.: Стройиздат, 1966.-С.388-391.
4. Гусев В.П. Из опыта борьбы с шумом оборудования инженерных систем // АВОК. 2012. № 3. С. 64–76.
5. ГОСТ ИСО 5348-2002 «Механическое крепление акселерометров». М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации РФ (протокол N 21 от 30 мая 2002 г.). М.: Госстрой России, 2000.
6. Калашников Б.А., Рассказова Н.Н. Влияние массы объекта на частотные характеристики при поддержании постоянства его положения // Омский научный вестник. 2011. №2 (100) С.134
7. МУК 4.3.2194-07 «Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях».
8. Овсянников С.Н., Лымарева Е.А. Исследование распространения структурного шума на моделях фрагментов здания// Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: сб. материалов V Всероссийской научно-практической конференции. 2015. С. 340-348
9. Овчинников С.Н. Распространение структурного звука в гражданских зданиях: дис. ... д-р техн. наук: 05.23.01. Томск, 2001.
10. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. М: Машиностроение, 1967.
11. Plotnikov A., Zhilina T. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. С. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012022
12. Plotnikov A., Zhilina T. MATEC Web of Conferences. 2018. С. 01010. DOI: 10.1051/mateconf/201714301010.
13. Тупов В.Б. Снижение шума от объектов большой и малой энергетики // Доклады V Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: Айсинг, 2015. С. 55–64.
14. Свод Правил «51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)» от 20.05.2011. М.: Минстрой России, 2017.

15. M.Ermann, J.Wiley, Architectural Acoustics (John Wiley & Sons Inc, 2017)
16. Brown, Alan Lex, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise16, 550-556 (2016).
17. Свод Правил «41-104-2000 Проектирование автономных источников теплоснабжения» от 16.08.2000. М.: Госстрой России, 2000.
18. ГОСТ 12.1.012-2004 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования». Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке (протокол N 15 от 4 февраля 2004 г.). М.: Госстрой России, 2004

References

1. Energy strategy of Russia for the period until 2030. Morning. By order of the Government of the Russian Federation dated November 13, 2009 No. 1715-r / Institute for Energy Strategy [Energeticheskaya strategii Rossii na period do 2030 g. Utr. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 13.11.2009 g. № 1715-r / Institut energeticheskoy strategii]. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed: 04/20/2019). (rus)
2. On the situation with heat supply in the Russian Federation: report / Energy Development Fund. 2016 Moscow [O situacii s teplosnabzheniem v RF: otchet / Fond energeticheskogo razvitiya. 2016 g. Moskva]. URL: <http://www.energsovet.ru/stat880.html> (04/15/2018). (rus)
3. Blokhina I.P. Dynamic properties of soundproof materials for floating floors / In the book: Struggle against noise and vibrations. Moscow: Stroyiz-dat, 1966, p. 388-391. (rus).
4. Gusev V.P. From the experience of dealing with noise of equipment of engineering systems [Iz opyta bor'by s shumom oborudovaniya inzhenernyh sistem] // ABOK. 2012. No. 3. P. 64–76. (rus)
5. GOST ISO 5348-2002 "Mechanical mounting of accelerometers". Moscow: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification of the Russian Federation (Protocol No. 21 of May 30, 2002). М.: Gosstroy of Russia, 2000.
6. Kalashnikov B.A., Rasskazova N.N. . influence of the object's mass on frequency characteristics while maintaining the constability of its position [vliyanie massy ob"ekta na chastotnye harakteristiki pri podderzhanii postoyanstva ego polozheniya]// Omsk Scientific Herald. 2011. No2 (100) S. 134 (rus)
7. MUK 4.3.2194-07 «Noise level monitoring in residential buildings, residential and public buildings».
8. Ovsyannikov S. N., Lymareva E. A. Research of the distribution of structural noise on models of buildings fragments [issledovanie rasprostraneniya strukturnogo shuma na modelyah fragmenov zdaniya]// Investments, construction, and real estate as a material basis for modernization and innovative development of the economy: coll. materials of the V All-Russian scientific-practical conference. 2015.S. 340-348 (rus)
9. Ovchinnikov S.N. Distribution of structural sound in civil buildings: dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.23.01. Tomsk, 2001 [Rasprostranenie strukturnogo zvuka v grazhdanskih zdaniyah: dis. ... d-r tekhn. nauk: 05.23.01. Tomsk, 2001].
10. Panovko Y. G. Fundamentals of the applied theory of elastic vibrations [Osnovy prikladnoj teorii uprugih kolebanij]. M: Mechanical engineering, 1967. (rus)
11. Plotnikov A., Zhilina T. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. C. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012022
12. Plotnikov A., Zhilina T. MATEC Web of Conferences. 2018. C. 01010. DOI: 10.1051/mateconf/201714301010.

13. Tupov V.B. Decrease in noise from objects of large and small energy [Snizhenie shuma ot ob"ektov bol'shoj i maloj energetiki]// Doklady V Vseros. scientific-practical conf. SPb .: Iceing, 2015. S. 55–64. (rus)
14. Code of Practice «51.13330.2011 Noise protection. The updated version of SNiP 23-03-2003 (with Amendment No. 1)» [Svod Pravil "51.13330.2011 Zashchita ot shuma. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 23-03-2003 (s Izmeneniem N 1)" ot 20.05.2011] dated 05/20/2011. M: Ministry of Construction of Russia, 2017.
15. Ermann M., Wiley J. Architectural Acoustics. Virginia, 2017. 243
16. Brown, Alan Lex. Systematic Review of Evidence of the Effect of Transport Noise Interventions on Human Health: Implications for Future Studies and Management. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise. 2016. Pp. 550-556.
17. Code of Practice «41-104-2000 Design of independent heat supply sources». M.: Gosstroy of Russia, 2000.
18. GOST 12.1.012-2004 «Occupational safety standards system. Vibration safety. General requirements» Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification by Correspondence (Minutes No. 15 dated February 4, 2004). M.: Gosstroy of Russia, 2004.