



УДК 624.012.4:183.2

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.81-90

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Учет вибрационных нагрузок в проектировании конструкций реверберационной акустической камеры в программном комплексе Midas FX

Д.С. Ванус^{1*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

*dahiws@Gmail.com

Ключевые слова: реверберационная акустическая камера, программный комплекс Midas FX, акустическое и воздушное давление, вибрационные нагрузки.

История статьи

Поступила в редакцию: 30.06.2023

Доработана: 15.07.2023

Принята к публикации: 21.07.2023

Для цитирования

Ванус Д.С. Учет вибрационных нагрузок в проектировании конструкций реверберационной акустической камеры в программном комплексе Midas FX // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 4. № 4. С. 81–90.

Аннотация. В данной статье изложены основные положения при проектировании акустической реверберационной камеры, способы моделирования таких объектов в инженерно-строительной практике. Представлена конечно-элементная модель объекта в программном комплексе Midas FX. В результате расчета можно оценить компоненты напряженно-деформированного состояния в бетоне и в элементах конструкций или на контактной поверхности, влияние вибрационных нагрузок на конструкции РАК, их взаимодействие с фундаментом и грунтовым основанием, а также анализ применения виброизоляторов в фундаменте РАК. По результатам анализа даны рекомендации по выполнению расчётов элементов системы, подбору конструктивных решений.

Accounting for Vibration Loads in the Design of Acoustic Reverberation Chamber Structures in the Midas FX Software Package

Dakhi S. Vanus^{1*}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

*dahiws@Gmail.com

Keywords: acoustic reverberation chamber, Midas FX software package, acoustic and air pressure, vibration loads

Abstract. This article outlines the main provisions in the design of an acoustic reverberation chamber, methods for modeling such objects in engineering and construction practice. A finite element model of an object is presented in the Midas FX software package.

Ванус Дахи Сулеман, канд. техн. наук, доцент каф. «Железобетонные и каменные конструкции», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57197844773, ResearcherID: AEO-1054-2022, E-mail: dahiws@Gmail.com.

© Ванус Д.С., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Article history

Received: 30.06.2023

Revised: 15.07.2023

Accepted: 21.07.2023

For citation

Vanus D.S. Accounting for Vibration Loads in the Design of Acoustic Reverberation Chamber Structures in the Midas FX Software Package. *Reinforced concrete structures*. 2023;4(4):81–90.

As a result of the calculation, it is possible to evaluate the components of the stress-strain state in concrete and in structural elements or on the contact surface, the effect of vibration loads on RAC structures, their interaction with the foundation and soil base, as well as analysis of the use of vibration isolators in the RAC foundation. Based on the results of the analysis, recommendations are given for perform calculations of system elements, select design solutions.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, чрезмерные вибрационные нагрузки могут привести к повреждению фундаментов под оборудованием и к существенному снижению прочностных характеристик элементов конструкций. Примером исследования влияния вибрационной нагрузки может служить проектирование реверберационной акустической камеры (РАК).

Реверберационная Акустическая Камера является испытательной системой для вибрационных испытаний космического аппарата (КА) или деталей летательного аппарата, расположенных в близости к двигателю. Реверберационная Акустическая Камера (РАК) представляет собой большую бетонную коробку, в который помещается изделие для испытаний, и внутрь которого поступает необходимый для нагрузки шум, равномерно распределяясь вокруг КА [1, 2, 3].

Важнейшим фактором при конструировании реверберационных камер является обеспечение весьма малого коэффициента звукопоглощения внутренних ограждающих поверхностей. В реверберационной камере учитываются следующие требования:

- 1) минимальный объем камеры зависит от нижней граничной частоты;
- 2) средний коэффициент звукопоглощения 0,05;
- 3) распределение нормальных мод колебаний объема камеры.

В данной статье поставлена задача оценить влияние вибрационных нагрузок на конструкции РАК, их взаимодействие с фундаментом и грунтовым основанием. Весьма важно провести в дальнейшем анализ применения виброизоляторов в фундаменте РАК и сравнение их эффективности.

МЕТОД

РАК представляет собой испытательный стенд в виде изолированно расположенного помещения (рис.1) [4,22], выполненного из монолитного железобетона. Внутренний объем акустической камеры должен составлять не менее 950 м³, имея следующие внутренние габариты [5]:

- длина 9,50 м; ширина 8,00 м; высота 12,60 м; толщина стен и перекрытий акустической камеры должна составлять не менее 500 мм [7].

Акустическая камера представляет собой пространственную железобетонную коробку, состоящую из четырех стен толщиной 500 мм и общей высотой 13,10 м, плиты покрытия толщиной 500 мм и плиты пола толщиной 500 мм. В стене между осями выполняется отверстие размером 6 м (ширина) x 10 м (высота) для установки железобетонной двери толщиной 500 мм. Фундамент акустической камеры развязан с основным фундаментом здания.

Dakhi S. Vanus, Candidate of Technical Sciences, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation, Scopus: 57197844773, Researcher ID: AEO-1054-2022, E-mail: dahiws@Gmail.com.

Согласно СП 63.13330.2018, принято:

- бетон класса В40 для стен и плит перекрытия;
- арматура класса А500С.

Согласно исходным данным была создана геометрия пространственной расчетной схемы РАК [7, 8] (рис. 1).

Для эффективной функциональности и создания многократности отражения звуковых волн коробка камеры проектируется неправильной формы с отклонением параллельных плоскостей на 5-10 градусов, но в данной статье рассматриваем конструкцию с параллельными плоскостями.

Каждому конструктивному элементу был присвоен соответствующий материал, определена жесткость, приложены нагрузки. Были составлены таблицы загрузжений, расчетных сочетаний нагрузок (РСН) и расчетных сочетаний усилий (РСУ) [9, 10].

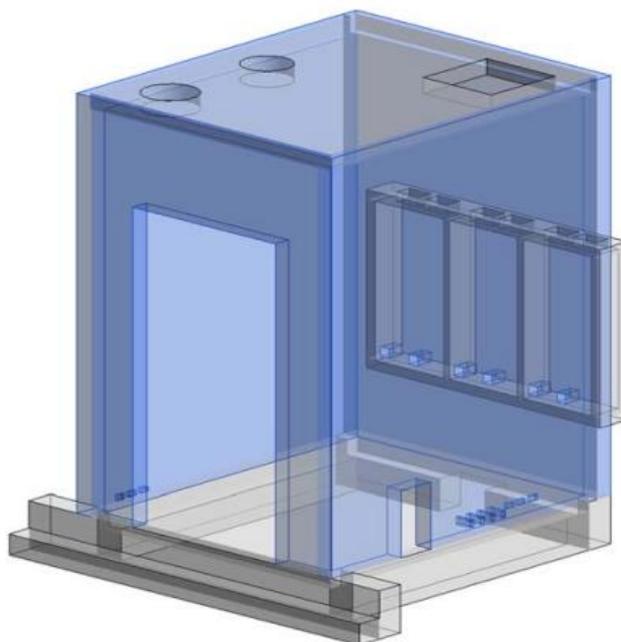


Рисунок 1. Пространственная модель РАК
Figure 1. 3D model of a reverberant acoustic chamber

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчета арматуры была создана 3D-модель из конечных элементов (рис. 2). Стены, покрытие и плита пола были смоделированы с помощью двумерных "элементов оболочки", а раскос дверной рамы был смоделирован с помощью "балочных элементов". Были учтены нагрузки на дверной проем как в закрытом, так и в открытом положении [11-15]. После создания геометрии расчетной схемы был произведен расчет последующих операций:

- 1) Сбор нагрузок на расчетную схему;
- 2) Проверка стен и потолка РАК на изгиб;
- 3) Проверка стен и потолка РАК на сдвиг.

Программное обеспечение рассчитывает собственный вес железобетонных конструкций, в данном случае – вес железобетонной двери РАК, собственный вес которой приходится на нижнюю балку основания [17,18] (рис. 3).

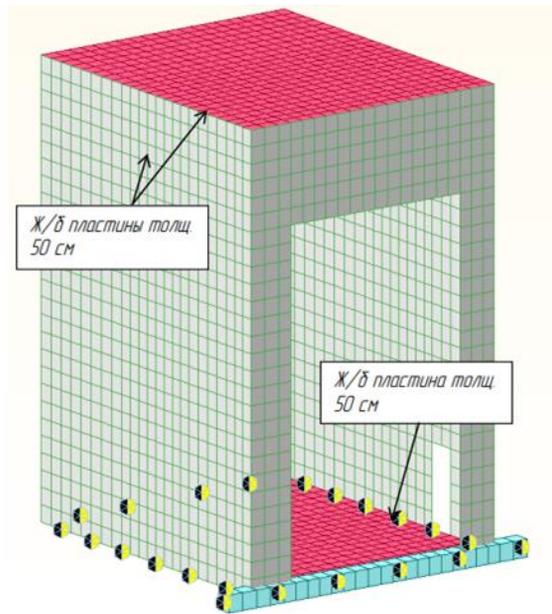


Рисунок 2. КЭ модель РАК

Figure 2. FE model of a reverberant acoustic chamber

ПН – дверь закрыта

ПН – дверь открыта

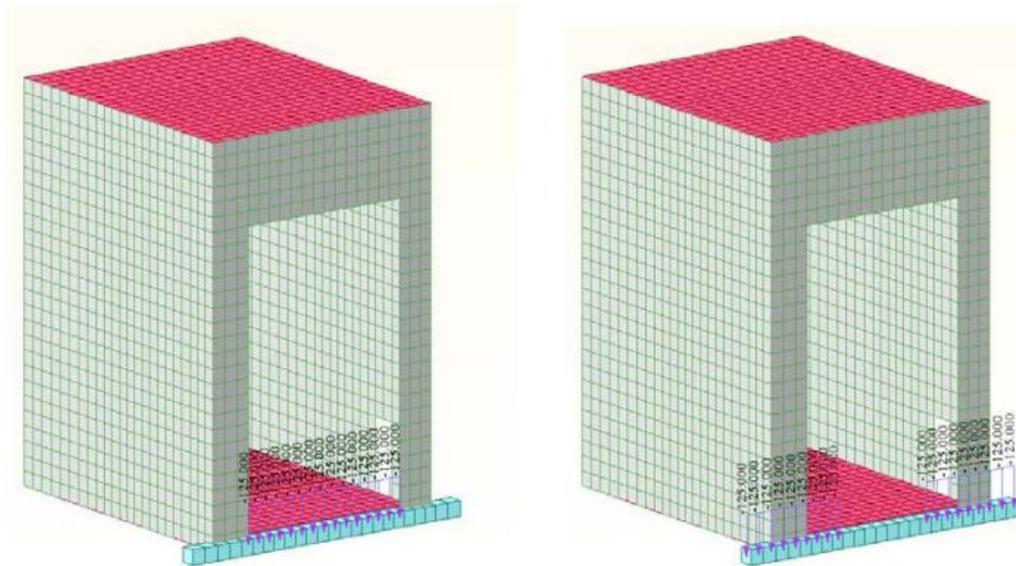


Рисунок 3. Нагрузки от двери РАК

Figure 3. Loads acting on doors of a reverberant acoustic chamber

Нагрузка на внутреннюю структуру принята как максимальное кратковременное значение приложенной нагрузки (рис. 4).

Акустическое и воздушное давление [19,21] передает нагрузки во всех плоскостях. Нагрузки принимаются из расчета максимально допустимых при испытаниях космических аппаратов (рис. 5, 6).

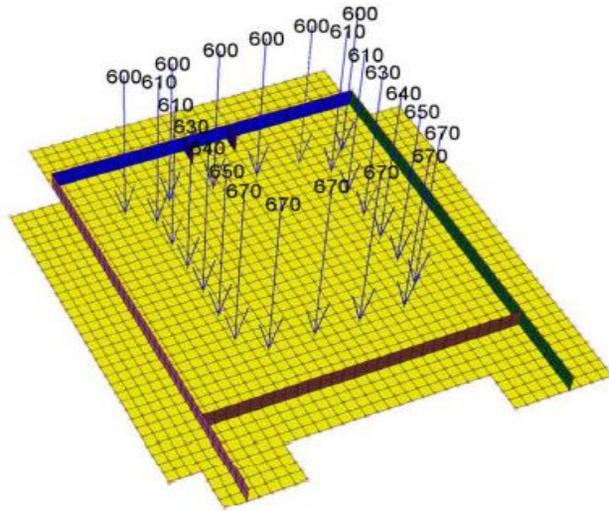


Рисунок 4. Нагрузки на внутреннюю структуру
Figure 4. Loads acting on the internal structure

Для стен: давление изнутри наружу

Для пола и потолка: давление изнутри наружу

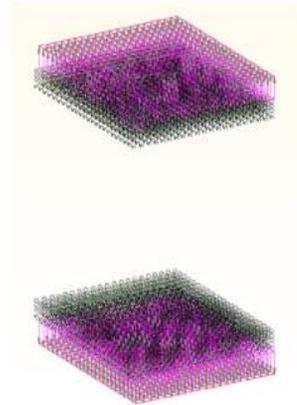
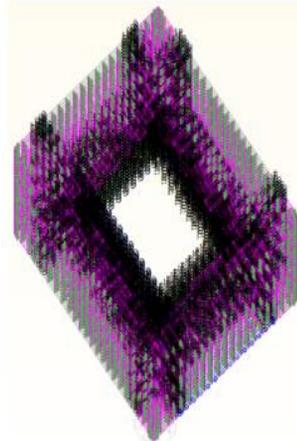


Рисунок 5. Акустическое давление
Figure 5. Acoustic pressure

Для стен: давление изнутри наружу

Для пола и потолка: давление изнутри наружу

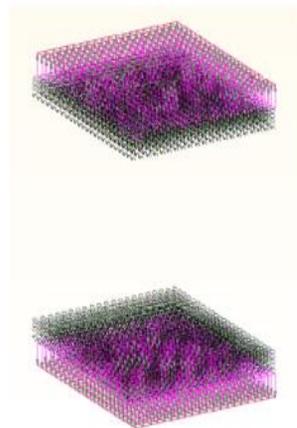
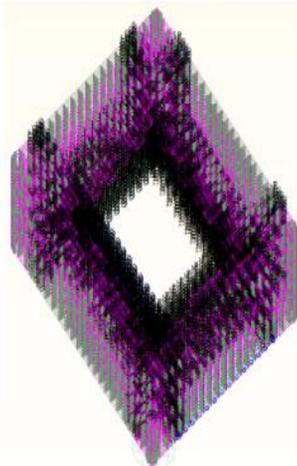


Рисунок 6. Воздушное давление
Figure 6. Air pressure

Акустическое давление АД = 5000 МПа = 5,0 кН/м².

Воздушное давление ВД = 2500 МПа = 2,50 кН/м².

В расчете учитывалось давление уплотнителя на двери в закрытом положении.

Давление уплотнителя [16,20] представляет собой давление в 1 бар (100 кН/м²) на поверхность двери длиной в 16,9 м (3,2 + 3,2 + 10,5) и шириной 0,12 м.

Таким образом, полученная нагрузка составляет 202 кН.

Исходя из технических характеристик устройства двери при закрытии или открытии на дверь воздействуют нагрузки, указанные на рис. 7 и табл. 1.

В случае «А» указаны расчетные нагрузки в открытом положении двери. В случае «В» - в закрытом положении двери.

Таким образом, в имеющейся расчетной модели вышеуказанные реакции учитываются как действия нагрузок.

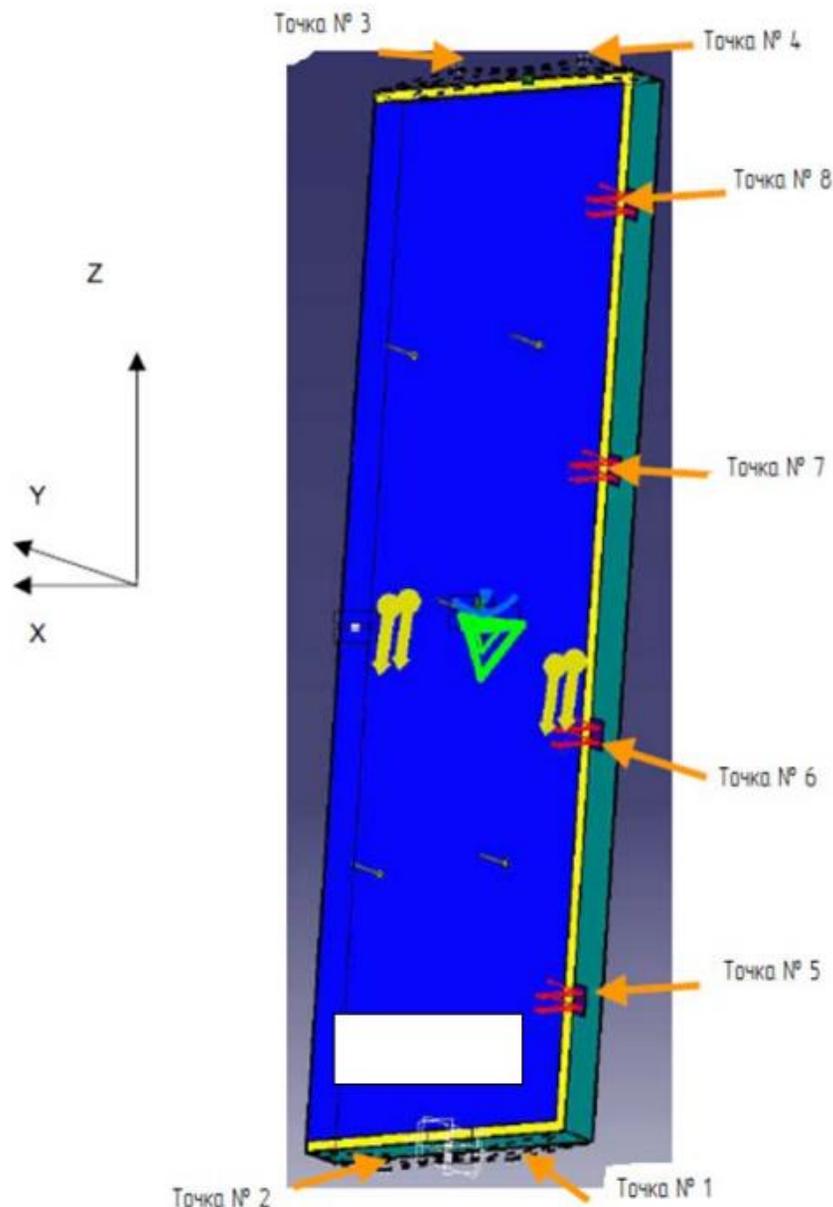


Рисунок 7. Нагрузки от двери
Figure 7. Loads acting on the doors

Таблица 1

Нагрузки в открытом и закрытом положении

Случай	Точка реакции	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8
Случай А	F_x	0	0	0	0	0	0	0	0
	F_y	-239	512	32	-306	0	0	0	0
	F_z	309330	281591	0	0	0	0	0	0
Случай Б	F_x	0	0	0	0	0	0	0	0
	F_y	140881	-22589	-24001	145341	27715	84053	83047	21553
	F_z	305556	285365	0	0	0	0	0	0

Table 1

Load acting at open and closed doors

Cases	Point of a reaction	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8
Case A	F_x	0	0	0	0	0	0	0	0
	F_y	-239	512	32	-306	0	0	0	0
	F_z	309330	281591	0	0	0	0	0	0
Case B	F_x	0	0	0	0	0	0	0	0
	F_y	140881	-22589	-24001	145341	27715	84053	83047	21553
	F_z	305556	285365	0	0	0	0	0	0

В расчетной схеме [1,2] учитывались случайные переменные нагрузки на плиту покрытия пола и плиту перекрытия потолка, равные 20 кН/м^2 (рис. 8).

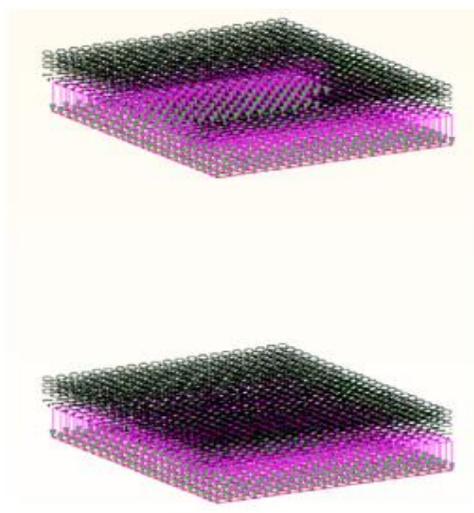


Рисунок 8. Переменные нагрузки на плиту пола и покрытия
Figure 8. Live loads acting on the floor slab and roof

Изучив технические характеристики, можно считать целесообразным использование виброизоляторов данного производителя при проектировании РАК в количестве 225 шт. для нормального распределения номинальной вертикальной нагрузки [12, 13, 14].

Для определения количества пружинных опор необходимо произвести расчет динамических характеристик конструкций РАК с учетом действующих нагрузок. Расчет производится

с помощью модуля «Анализ свободных колебаний» в программном комплексе Midas FX [6,8] по аналогии с ранее приведенным расчетом (рис. 9).

Node	Mode	UX	UY
	Mode No	Frequency (rad/sec)	Frequency (circle/sec)
	1	9.3358	2.2230
	2	10.0576	2.2749
	3	20.5039	3.5653
	4	25.1019	4.5487
	5	32.2140	5.6380
	6	32.5222	5.8283
	7	70.2445	6.4810
	8	88.4943	14.084
	9	120.5432	19.1850
	10	136.3525	21.7012

Рисунок 9. Результаты анализа вибрационных режимов
Figure 9. Results of analysis of vibration modes

По результатам проведенных испытаний получены следующие трансляционные (поступательное движение) режимы:

- Режим № 1 - Трансляция в направлении X с частотой = 2,22 Гц < 5,0 Гц;
- Режим № 2 - Трансляция в направлении Y с частотой = 2,27 Гц < 5,0 Гц;
- Режим № 4 - Трансляция в направлении Z с частотой = 4,54 Гц < 5,0 Гц.

Также наблюдаются 6 режимов жесткого тела:

- Режим № 1 – Частота = 2,22 Гц < 6,0 Гц;
- Режим № 2 – Частота = 2,27 Гц < 6,0 Гц;
- Режим № 3 – Частота = 3,56 Гц < 6,0 Гц;
- Режим № 4 – Частота = 4,55 Гц < 6,0 Гц;
- Режим № 5 – Частота = 5,63 Гц < 6,0 Гц;
- Режим № 6 – Частота = 5,82 Гц < 6,0 Гц;

По результатам анализа динамических характеристик [12, 15] конструкций РАК в совместной работе с виброизоляторами Isotop DSD BL констатируем факт выполнения условий нормальной работы конструкций и целесообразности использования данных виброизоляторов при проектировании РАК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования, выявлено влияние жесткости виброизоляционных опор на величину и характер колебаний в программном комплексе Midas FX. Было установлено, что чем меньше жесткость виброизолятора, тем больше частота колебаний, что говорит о большей передаче вибраций от конструктивной схемы на фундамент.

Во время сравнительного анализа результатов было замечено, что большая часть распределения усилий и напряжений происходит в вертикальных конструкциях, близким к фундаменту. Это распределение приводит к необходимости локального изменения армирования сечений, класса бетона, арматуры.

Необходимость представления подробного расчета подобных систем в виде математических моделей и анализ достоверности результатов имеют большое значение в современном проектировании. Расчет всей конструктивной системы совместно позволяет точно смодели-

ровать «поведение» конструкций и основания, учесть влияние жесткости конструкций. Вариантный расчет на аналогичных виброизоляционных блоках наглядно показывает значимость вертикальной и горизонтальной жесткости и изменение конструктивных, экономических решений в следствие её изменении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустика: Справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров; Под ред. М. А. Сапожкова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 336 с. 92
2. *Вахитов Я.Ш., Давыдов Д.А.* Метод построения модели реверберации, адекватной реальному процессу распространения сигнала // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 4. С. 32-36
3. *Боголепов И. И.* Архитектурная акустика. Учебник – справочник. СПб.: 2001. 180 с.
4. *Луцци С., Васильев А.В.* Итальянский и российский опыт оценки влияния шума и воздействия на здоровье человека и планирования урбанизированных территорий с учетом шумового фактора // *Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛРПТ*. 2015. С. 77-87.
5. *Тамразян А.Г.* Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. №1(1). С. 5-18.
6. *Городецкий А.С., Евзеров И.Д.* Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 344 с.
7. *Перельмутер А. В., Сливкер В.И.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 600 с.
8. Руководство пользователя Midas FX: Пер. с англ. СПб: НИП-Информатика, 2015. 430 с.
9. *Власов А.Н., Волков-Богодский Д.Б.* Конечно-элементное моделирование // *Вестник МГСУ*. 2012. №2. С. 52-65.
10. *Ванус Д.С., Борисов А.Д.* Исследование влияния сцепления арматуры с бетоном на прочность изгибаемых элементов в стадии эксплуатации // *Наука и бизнес: пути развития*. 2021. № 11(125).
11. *Alekseytsev A.V.* Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. № 3 (103). С. 10306.
12. *Fedorova N.V., Savin S.Y.* Time of dynamic impact to elements of RC frame at column buckling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 033030.
13. *Kabantsev O.V., Mitrovitch B.* Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 012002.
14. *Тамразян А.Г., Алексейцев А.В.* Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 7. С. 819-830.
15. *Тамразян А.Г., Алексейцев А.В.* Эволюционная оптимизация нормально эксплуатируемых железобетонных балочных конструкций с учетом риска аварийных ситуаций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 9. С. 45-50.
16. *Алексейцев А.В.* Анализ устойчивости колонны при горизонтальных ударных воздействиях // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 2. № 2. С. 3–12.
17. *Люблинский В.А.* О кручении несимметричных несущих систем многоэтажных зданий // *Железобетонные конструкции*. 2023. №1(1). С. 37-45.
18. *Степанов А.С.* Сравнение расчетов по СНиП 2.02.01-87 и по результатам применения специализированных программ // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. №7 (22). С. 9-23.
19. *Евсеев Н.А.* Развитие метода расчета зданий монолитной конструктивной системы во взаимодействии с основанием при учете физически нелинейной работы железобетонных конструкций: дис. канд. техн. наук: 05.23.01. М., 2021, 175 с.
20. *Шулятьев С.О.* Влияние несущего каркаса здания на напряженно-деформированное состояние фундаментной плиты: дис. канд. техн. наук: 05.23.02. М., 2013, 142 с.
21. *Kim S., Hwang J., Ryu J., Song M.* Prediction of Vibration-Mode-Induced Noise of Structure–Acoustic Coupled Systems // *Appl. Sci*. 2022. 12(20). 10496; <https://doi.org/10.3390/app122010496>

REFERENCES

1. Acoustics: A Handbook. A. P. Efimov, A. V. Nikonov, M. A. Sapozhkov, V. I. Shorov; Ed. M. A. Sapozhkova. 2nd ed., revised. and additional. Moscow: Radio and communication, 1989. 336 p. (in Russ.)
2. Vakhitov Ya.Sh., Davydov D.A. A method for constructing a reverberation model adequate to the real process of signal propagation. *Fundamental research*. 2015. No. 4. Pp. 32-36. (in Russ.)
3. Bogolepov I. I. Architectural acoustics. Textbook - reference book. St. Petersburg: 2001. 180 p. (in Russ.)

4. Luzzi S., Vasiliev. A.V. Italian and Russian experience in assessing the impact of noise and impact on human health and planning urbanized areas taking into account the noise factor. *Ecology and life safety of industrial and transport complexes ELPIT*. 2015. Pp. 77-87. (in Russ.)
5. Tamrazyan A.G. Methodology for the analysis and assessment of the reliability of the state and forecasting the service life of reinforced concrete structures. *Reinforced concrete structures*. 2023. No. 1(1). Pp. 5-18. (in Russ.)
6. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures. Kyiv: Fact, 2005. 344 p. (in Russ.)
7. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Calculation models of structures and the possibility of their analysis. Kyiv: Steel, 2002. 600 p. (in Russ.)
8. User Manual Midas FX: Per. from English. St. Petersburg: NIP-Informatics, 2015. 430 p. (in Russ.)
9. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B. Finite element modeling. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 2. Pp. 52-65. (in Russ.)
10. Vanus D.S., Borisov A.D. Study of the effect of adhesion of reinforcement to concrete on the strength of bending elements in the operation stage. *Science and Business: Ways of Development*. 2021. No. 11(125). (in Russ.)
11. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 3 (103). Pp. 10306.
12. Fedorova N.V., Savin S.Y. Time of dynamic impact to elements of RC frame at column buckling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 033030.
13. Kabantsev O.V., Mitrovitch B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 012002. (in Russ.)
14. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimal design of load-bearing structures of buildings, taking into account the relative risk of accidents. *Vestnik MGSU*. 2019. V. 14. No. 7. Pp. 819-830. (in Russ.)
15. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Evolutionary optimization of normally operated reinforced concrete beam structures, taking into account the risk of emergency situations. *Industrial and civil construction*. 2019. No. 9. Pp. 45-50. (in Russ.)
16. Alekseytsev A.V. Analysis of column stability under horizontal impact. *Reinforced concrete structures*. 2023. Vol. 2. No. 2. Pp. 3–12. (in Russ.)
17. Lyublinsky V.A. On the torsion of asymmetric bearing systems of multi-storey buildings. *Reinforced concrete structures*. 2023. No. 1(1). Pp. 37-45. (in Russ.)
18. Stepanov A.S. Comparison of calculations according to SNiP 2.02.01-87 and according to the results of the use of specialized programs. *Construction of unique buildings and structures*. 2014. No. 7 (22). Pp. 9-23. (in Russ.)
19. Evseev N. A. Development of a method for calculating buildings of a monolithic structural system in interaction with the base when taking into account the physically nonlinear operation of reinforced concrete structures: dis. cand. tech. Sciences: 05.23.01. M., 2021, 175 p. (in Russ.)
20. Shulyatiev S. O. Influence of the supporting frame of the building on the stress-strain state of the foundation slab: dis. cand. tech. Sciences: 05.23.02. M., 2013, 142 p. (in Russ.)
21. Kim S., Hwang J., Ryu J., Song M. Prediction of Vibration-Mode-Induced Noise of Structure–Acoustic Coupled Systems. *Appl. Sci*. 2022. 12(20). 10496; <https://doi.org/10.3390/app122010496>